

Titre: Caractérisation de résidus miniers à l'aide d'essais de pénétration
Title: au cône

Auteur: Raluca-Iona Opris
Author:

Date: 2017

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Opris, R.-I. (2017). Caractérisation de résidus miniers à l'aide d'essais de
Citation: pénétration au cône [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal].
PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/2905/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/2905/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Michael James, & Benoît Courcelles
Advisors:

Programme: Génie minéral
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CARACTÉRISATION DE RÉSIDUS MINIERES À L'AIDE D'ESSAIS DE
PÉNÉTRATION AU CÔNE

RALUCA-IOANA OPRIS

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DE MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MINÉRAL)

DÉCEMBRE 2017

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

CARACTÉRISATION DE RÉSIDUS MINIERs À L'AIDE D'ESSAIS DE
PÉNÉTRATION AU CÔNE

présenté par : OPRIS, Raluca-Ioana

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. SIMON Richard, Ph. D., président

M. JAMES Michael, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. COURCELLES Benoît, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

M. GRENIER Simon, Ph. D., membre

DÉDICACE

« Se réunir est un début, rester ensemble est un progrès, travailler ensemble est la réussite »

– Henri Ford

À ma famille, amis et proches

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier spécialement M. Michael James pour sa patience, son temps alloué en vue de la réalisation de ce mémoire ainsi que pour les connaissances qu'il m'a transmises qui me seront utiles dans ma carrière en géotechnique. Je voudrais aussi remercier Professeur Benoît Courcelles qui est devenu mon codirecteur vers de la fin de ma maîtrise, mais qui m'a offert de son temps et son support, ce qui m'a aidé à mener à bout ce projet.

Je tiens également à remercier tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin tout au long de ma maîtrise : M. Michael Ghali et le Professeur Mourad Karray pour leur grande aide dans le laboratoire à l'Université Sherbrooke; M. Samuel Chénier au laboratoire de mécanique des sols à Polytechnique; M. Jean-Hugues Deschênes pour avoir suivi mes progrès avec toujours le même enthousiasme contagieux; M. Guillaume Léveillé pour tous les échanges que nous avons eu, semaines après semaines.

Finalement, je tiens à dire merci à ma famille et à Dan pour leur support constant.

RÉSUMÉ

Dans le cadre d'un programme de recherche sur l'utilisation des inclusions de roches stériles pour améliorer le comportement des parcs à résidus, ce projet porte sur l'utilisation d'essais de pénétration au cône (CPT) pour caractériser les résidus miniers. Beaucoup de relations développées pour les essais CPT ont prouvé leur fiabilité pour les sols naturels normalement consolidés et surconsolidés. Malheureusement, très peu de travail a été réalisé pour confirmer l'applicabilité et la validité de ces corrélations pour les résidus miniers qui sont des matériaux fins produits par les concentrateurs des mines. Ils sont déposés hydrauliquement, ce qui fait en sorte qu'ils sont lâches et saturés avec un état de consolidation très variable.

Dans ce mémoire, les résultats d'essais conventionnels, d'essais CPT en laboratoire et d'essais CPTu/SCPTu dans le parc à résidus de la mine Canadian Malartic sont présentés et évalués. Les essais CPT en laboratoire ont été réalisés dans une cellule instrumentée de taille intermédiaire dans laquelle les résidus ont été placés et soumis à différents niveaux de contraintes verticales (20 à 110 kPa). La vérification de l'applicabilité des corrélations existantes reliant les propriétés et les caractéristiques des résidus aux résultats d'essais CPT a été faite en comparant les propriétés obtenues avec ces corrélations et celles obtenues à l'aide d'essais conventionnels de laboratoire. Il est remarqué qu'une calibration de ces corrélations est nécessaire pour obtenir les valeurs du poids volumique, du module de cisaillement ainsi que la vitesse des ondes de cisaillement équivalente à partir des lectures de résistance en pointe. Les corrélations calibrées sont alors appliquées sur les données des essais CPTu et SCPTu réalisés sur le terrain pour déterminer les propriétés des résidus *in situ*, ainsi que leur évolution entre 2013 et 2016. Également, les contraintes effectives et les pressions interstitielles *in situ* ont pu être déterminées. L'analyse des conditions *in situ* des résidus miniers de Canadian Malartic et de leurs propriétés géotechniques sont finalement présentées dans ce mémoire.

ABSTRACT

As a part of a comprehensive project on the use of waste rock inclusions to improve the performance of tailings impoundments, the use of cone penetration testing (CPT) to characterize tailings was studied. Numerous correlations developed for CPT are currently in use for natural, normally consolidated and overconsolidated soils. Unfortunately, very little research has been conducted on tailings to validate the applicability of these correlations to tailings which are a fine-grained waste produced during mineral extraction. Tailings are hydraulically deposited causing them to be saturated and loose with a varying degree of consolidation.

In this document, the results of conventional laboratory testing, laboratory CPT tests and CPTu/SCPTu field tests at the Canadian Malartic mine are presented and discussed. The laboratory CPT were performed in an instrumented, intermediate-sized cell in which tailings were consolidated under various levels of vertical stress (20 to 110 kPa). The applicability of the existing CPT correlations for natural soils to mine tailings was verified by comparing the properties obtained from the laboratory CPT results and the results from conventional laboratory testing. A calibration of the correlations was necessary to obtain the correct values for the unit weight, the shear modulus and the shear wave velocity obtained from the tip resistance. The calibrated correlations were then applied to the field CPTu and SCPTu data to determine the properties of the *in situ* tailings as well as their evolution between 2013 and 2016. A study of the *in situ* conditions and properties of the tailings in the Canadian Malartic impoundment based on CPT analysis is also presented in this thesis.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT	vi
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	xii
LISTE DES FIGURES.....	xiii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xviii
LISTE DES ANNEXES.....	xxii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Généralités.....	1
1.2 Objectifs du projet de recherche	2
1.3 Méthodologie et contenu du mémoire.....	3
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	5
2.1 Les rejets miniers, leur gestion et les défis de l'industrie minière	5
2.2 Les résidus miniers	7
2.2.1 Caractéristiques des résidus de mines en roche dure	7
2.2.1.1 Densité relative des grains et poids volumique.....	9
2.2.1.2 Granulométrie, plasticité et classification.....	9
2.2.1.3 Indice de densité relative	11
2.2.1.4 Conductivité hydraulique.....	11
2.2.1.5 Paramètres de consolidation	12
2.2.1.6 Paramètres de résistance au cisaillement	12

2.3	Essais de pénétration au cône	13
2.3.1	Introduction	13
2.3.2	Corrélations existantes pour le CPT	16
2.3.2.1	Identification et classification des sols	17
2.3.2.2	Teneur en particules fines	20
2.3.2.3	Poids volumique.....	21
2.3.2.4	Indice de densité relative	22
2.3.2.5	Résistance au cisaillement non drainé	23
2.3.2.6	Angle de frottement interne effectif.....	23
2.3.2.7	Module de cisaillement	26
2.3.2.8	Indice N de l'essai SPT pour l'analyse de liquéfaction	27
2.3.2.9	Vitesse des ondes de cisaillement	28
2.3.2.10	Pressions interstitielles.....	31
2.3.3	Application aux résidus miniers	31
CHAPITRE 3 DESCRIPTION DU SITE ET DES CARACTÉRISTIQUES DES RÉSIDUS MINIERS DE CANADIAN MALARTIC		33
3.1	Description de la mine	33
3.2	Le parc à résidus de la mine Canadian Malartic.....	34
3.3	Caractéristiques des résidus de la mine Canadian Malartic	36
3.3.1	Densité relative des grains.....	36
3.3.2	Granulométrie, plasticité et classification	36
3.3.3	Indice des vides maximal et minimal.....	37
3.3.4	Conductivité hydraulique saturée.....	37
3.3.5	Paramètres de consolidation.....	38
3.3.6	Paramètres de résistance au cisaillement	38

3.3.7	Synthèse des résultats.....	39
CHAPITRE 4	ESSAIS EN LABORATOIRE ET SUR LE TERRAIN.....	40
4.1	Essais en laboratoire	40
4.1.1	Essais conventionnels.....	40
4.1.1.1	Densité relative des grains	40
4.1.1.2	Granulométrie, plasticité et classement	40
4.1.1.3	Indice des vides maximal et minimal.....	41
4.1.1.4	Paramètres de résistance en cisaillement	42
4.1.2	Essai de pénétration au cône	42
4.1.2.1	Essais CPT en laboratoire dans une cellule intermédiaire.....	43
4.1.2.2	Équipement	43
4.1.2.3	Méthodologie	47
4.1.2.4	Résultats des essais CPT en laboratoire.....	48
4.2	Essais sur le site Canadian Malartic	50
4.2.1	Essais CPTu en 2013.....	50
4.2.1.1	Généralités	50
4.2.1.2	Résultats en 2013	52
4.2.2	Essais CPTu/SCPTu en 2016	53
4.2.2.1	Généralités	53
4.2.2.2	Résultats en 2016	54
CHAPITRE 5	ANALYSE DES RÉSULTATS.....	56
5.1	Généralités	56
5.2	Analyse des résultats CPT de laboratoire	56
5.2.1	L'effet de confinement de la cellule.....	56

5.2.2	Paramètres et propriétés déterminées durant l'essai CPT de laboratoire	57
5.3	Validation des corrélations existantes	58
5.3.1	Identification et classification des sols.....	59
5.3.2	Teneur en particules fines	63
5.3.3	Poids volumique.....	65
5.3.4	Indice de densité.....	67
5.3.5	Résistance au cisaillement non drainé.....	69
5.3.6	Angle de frottement interne effectif.....	69
5.3.7	Module de cisaillement	71
5.3.8	Indice N de l'essai SPT	73
5.3.9	Vitesse des ondes de cisaillement	73
5.4	Caractérisation des conditions in situ avec la relation de Chen et Juang (1996).....	75
5.5	Calibration des corrélations existantes	81
5.5.1	Méthodologie	82
5.5.2	Poids volumique.....	82
5.5.3	Module de cisaillement	84
5.5.4	Vitesse des ondes de cisaillement	85
CHAPITRE 6	ÉVOLUTION DES CONDITIONS IN SITU	87
6.1	Généralités	87
6.2	Effet des inclusions sur les résidus miniers	87
6.2.1	Influence des inclusions sur les essais CPTu et SCPTu.....	88
6.2.2	Influence des inclusions sur les conditions in situ	91
6.2.3	Influence des inclusions sur le poids volumique.....	91
6.2.4	Influence des inclusions sur le module de cisaillement	92

6.2.5	Influence des inclusions sur la vitesse des ondes de cisaillement.....	93
6.2.6	Influence des inclusions sur l'indice de consolidation.....	94
6.3	Comparaison des conditions in situ de 2013 et 2016	94
6.3.1	Lectures du cône.....	96
6.3.2	Conditions in situ	98
6.3.3	Poids volumique.....	99
6.3.4	Module de cisaillement	100
6.3.5	Vitesse des ondes de cisaillement	101
6.3.6	Indice de consolidation.....	102
CHAPITRE 7	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	104
BIBLIOGRAPHIE	107
ANNEXES	115

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Propriétés géotechniques des résidus miniers provenant de mines en roche dure.....	8
Tableau 2-2 : Type de comportement d'un sol basé sur I_c et I_{cRW}	20
Tableau 3-1 : Caractérisation des résidus miniers de Canadian Malartic	39
Tableau 4-1 : Données de l'essai CPT en laboratoire	50
Tableau 5-1 : Ensemble des données obtenues pour les essais CPT en laboratoire.....	58

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Entreposage des rejets miniers solides à la mine Canadian Malartic (photos prises en juin 2016); (a) haldes à stériles, (b) parc à résidus.....	5
Figure 2-2 : Dépôt hydraulique des résidus miniers (photo prise en juin 2016).....	9
Figure 2-3 : Granulométrie de résidus miniers provenant de diverses mines en roche dure du Canada.....	10
Figure 2-4 : Hétérogénéité de la granulométrie de résidus miniers provenant de la même mine avant leur dépôt dans le parc à résidus	11
Figure 2-5 : Schéma de différents types de cônes.....	15
Figure 2-6 : Famille des cônes utilisés dans l'industrie et la recherche.....	15
Figure 2-7 : Système de classification SBTn proposé par Robertson (1990) modifié par Robertson (2009)	18
Figure 2-8 : Classification du type de comportement à partir de $Q(1-B_q)$ et F_r	19
Figure 2-9 : Corrélation entre V_s , γ et σ'_{vo}	22
Figure 2-10 : Corrélation entre q_c et I_D	22
Figure 2-11 : Indice de densité à partir de la résistance en pointe normalisée dans les sables propres normalement consolidés.....	23
Figure 2-12 : Corrélation pour déterminer ϕ' à partir du CPTu dans les sables naturels	24
Figure 2-13 : Évaluation de ϕ' à partir du CPTu dans les silts et les argiles	25
Figure 2-14 : Corrélation entre G_{max} et q_c	26
Figure 2-15 : Corrélation entre G_{max} et la résistance en pointe pour les sables, silts et argiles	27
Figure 2-16 : Variation de q_c/N en fonction du D_{50}	28
Figure 2-17 : Corrélation entre V_{s1} , Q_{tn} et D_{50} pour les sols fins	29
Figure 2-18 : Corrélation entre V_{s1} , q_{t1N} et I_c	30
Figure 3-1 : Localisation de la mine Canadian Malartic.....	33

Figure 3-2 : La mine Canadian Malartic en Abitibi-Témiscamingue (Québec)	34
Figure 3-3 : Coupe transversale de la Digue 5 illustrant la construction en amont de la digue (échelle 1 :1000).....	35
Figure 3-4 : Granulométrie des résidus miniers de Canadian Malartic.....	37
Figure 4-1 : Granulométrie des résidus miniers de Canadian Malartic.....	41
Figure 4-2 : Schéma de l'appareil de pénétration au cône dans une cellule de taille intermédiaire	43
Figure 4-3 : Appareil de simulation CPT de l'Université de Sherbrooke.....	44
Figure 4-4 : Schéma de la cellule instrumentée de l'Université de Sherbrooke	45
Figure 4-5 : Installation du cône dans la cellule pour réaliser l'essai CPT en laboratoire.....	46
Figure 4-6 : Résultats de laboratoire; (a) la résistance en pointe du cône en fonction de la contrainte imposée, (b) le frottement sur le manchon du cône en fonction de la contrainte imposée	49
Figure 4-7 : Localisation des essais CPTu en 2013 dans le parc à résidus de Canadian Malartic.	51
Figure 4-8 : Route d'accès pour l'essai CPT13-01	51
Figure 4-9 : Résultats typiques du CPTu dans le parc à résidus de Canadian Malartic en 2013; (a) résistance en pointe; (b) frottement sur le manchon; (c) pressions interstitielles; (d) indice de comportement des sols	53
Figure 4-10 : Localisation des essais CPTu et SCPTu en 2016 dans le parc à résidus de Canadian Malartic	54
Figure 4-11 : Résultats typiques d'un essai de pénétration au cône dans le parc à résidus de Canadian Malartic en 2016; (a) résistance en pointe; (b) frottement sur le manchon; (c) pression interstitielle; (d) indice de comportement des sols.....	55
Figure 5-1 : Intervalle typique des coefficients des terres au repos	57
Figure 5-2 : Mesures de l'essai SCPT16-67	58
Figure 5-3 : Mesures de l'essai SCPT16-71	59

Figure 5-4 : Classification des résidus sous-consolidés du SCPT16-67 de Canadian Malartic dans le graphique de Robertson (2016).....	61
Figure 5-5 : Classification des résidus normalement consolidés dans le laboratoire et sur le terrain du SCPT16-67 dans le graphique de Robertson (2016).....	62
Figure 5-6 : Classification selon le graphique de Jefferies & Been (2006)	63
Figure 5-7 : Teneur en fines des résidus du SCPT16-67 et SCPT16-71 basée sur la méthode de Davies (1999) avec le I_c	64
Figure 5-8 : Corrélation entre V_s , γ et σ_{vo}	66
Figure 5-9 : Poids volumique saturé estimé à l'aide du CPT/SCPT.....	67
Figure 5-10 : Corrélation entre q_c et I_D appliquée sur les données SCPT16-67 et CPT en laboratoire.....	68
Figure 5-11 : Résistance en pointe du cône et droite théorique basée sur Chen et Juang (1996) ..	70
Figure 5-12 : Modules de cisaillement obtenus à partir de q_c et V_s pour les résidus en laboratoire	72
Figure 5-13 : Valeurs de G_{max} pour le SCPT16-67 obtenues avec les différentes méthodes pour les résidus de l'essai SCPT16-67.....	72
Figure 5-14 : Comparaison des V_{s1} et V_s obtenus sur le terrain et avec la corrélation de Karray et Hussien (2017)	74
Figure 5-15 : Valeurs obtenues avec la corrélation entre V_{s1} , q_{t1N} et I_c du SCPT16-67	75
Figure 5-16 : Contraintes effectives in situ du SCPT16-67 comparées aux contraintes assumées	76
Figure 5-17 : Distribution des pressions interstitielles du SCPT16-67 comparée à la pression hydrostatique et la pression mesurée par le cône	77
Figure 5-18 : Contraintes effectives in situ SCPT16-71 comparées aux contraintes assumées.....	78
Figure 5-19 : Distribution des pressions interstitielles du SCPT16-71 comparée à la pression hydrostatique et la pression mesurée par le cône	79
Figure 5-20 : Indice de consolidation I_U appliqué au SCPT16-67	80

Figure 5-21 : Indice de consolidation I_U appliqué au SCPT16-71	81
Figure 5-22 : Corrélation calibrée pour estimer $\gamma_{in situ}$ sur la base des données du SCPT16-67	83
Figure 5-23 : Variation de $\gamma_{in situ}$ en fonction de l'élévation sur la base des données du SCPT16-67	83
Figure 5-24 : Comparaison des G_{max} obtenus à l'aide des différentes méthodes appliquées sur les données du SCPT16-67	84
Figure 5-25 : V_{s1} obtenus à partir des données de terrain et de la corrélation calibrée	86
Figure 6-1 : Emplacement des SCPT16-67 et SCPT16-71 par rapport aux digues et inclusions environnantes (photo prise en juin 2015)	88
Figure 6-2 : Comparaison des résistances en pointe (a) du SCPT16-67 (loin des inclusions); (b) du SCPT16-71 (près des inclusions)	89
Figure 6-3 : Comparaison du frottement sur le manchon (a) du SCPT16-67 (loin des inclusions); (b) du SCPT16-71 (près des inclusions)	90
Figure 6-4 : Comparaison des pressions interstitielles (a) du SCPT16-67 (loin des inclusions); (b) du SCPT16-71 (près des inclusions)	90
Figure 6-5 : Comparaison du poids volumique obtenu pour les résidus du SCPT16-67 et SCPT16-71	92
Figure 6-6 : Comparaison des G_{max} obtenus pour les résidus du SCPT16-67 et SCPT16-71	93
Figure 6-7 : Comparaison des vitesses d'ondes de cisaillement (a) obtenues sur le terrain; (b) obtenues avec la corrélation calibrée	94
Figure 6-8 : Emplacement des CPT13-01, CPT13-02 et SCPT16-68 (photo prise en juin de 2015)	95
Figure 6-9 : Comparaison des mesures de résistance en pointe des CPT13-01, CPT13-02 et SCPT16-68	96
Figure 6-10 : Comparaison des mesures de frottement sur le manchon des CPT13-01, CPT13-02 et SCPT16-68	97

Figure 6-11 : Comparaison des pressions interstitielles des CPT13-01, CPT13-02 et SCPT16-68	98
Figure 6-12 : Comparaison des contraintes effectives in situ des CPT13-01, CPT133-02 et SCPT16-68.....	99
Figure 6-13 : Comparaison du poids volumique des CPT13-01, CPT13-02 et SCPT16-68	100
Figure 6-14 : Comparaison des modules de cisaillement des CPT13-01, CPT13-02 et SCPT16-68 obtenus avec la corrélation calibrée	101
Figure 6-15 : Comparaison des vitesses d'ondes de cisaillement des CPT13-01, CPT13-02 et SCPT16-68 obtenues avec la corrélation calibrée.....	102
Figure 6-16 : Comparaison des indices de consolidation des CPT13-01, CPT13-02 et CPT16-68	103

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ASTM	American Society for Testing and Materials
c'	Cohésion effective (kPa)
C_c	Indice de compression
CPT	Essais de pénétration au cône (<i>Cone Penetration Test</i>)
CPTu	Essais du piézocône
C_U	Coefficient d'uniformité
c_v	Coefficient de consolidation verticale (mm^2/s , cm^2/s)
d	Diamètre du cône (mm)
D	Diamètre des particules (mm)
D_{10}	Diamètre correspondant à 10% du passant cumulé sur la courbe granulométrique (mm)
D_{60}	Diamètre correspondant à 60% du passant cumulé sur la courbe granulométrique (mm)
$D_{\text{cône}}$	Diamètre du cône (cm)
D_{cellule}	Diamètre de la cellule (cm)
D_r	Densité relative des grains
DMA	Drainage Minier Acide
DNC	Drainage Neutre Contaminé
E	Module de Young (kPa)
e	Indice des vides
e_f	Indice des vides final
e_{max}	Indice des vides maximal
e_{min}	Indice des vides minimal

FC	Teneur en fines (<i>Fine Content</i>) (%)
F_r	Rapport de frottement (%)
f_s	Frottement sur le manchon du cône (kPa)
G	Module de cisaillement (MPa)
G_{\max}	Module de cisaillement maximal (MPa)
h	Hauteur du cône (mm)
I_c	Indice de type de comportement des sols
I_D	Indice de densité relative
I_U	Indice de consolidation
k	Conductivité hydraulique (cm/s)
K	Ratio de la contrainte horizontale effective sur la contrainte verticale effective
K_0	Coefficient de pression des terres au repos
k_h	Conductivité hydraulique horizontale (cm/s)
k_{sat}	Conductivité hydraulique saturée (cm/s)
k_v	Conductivité hydraulique verticale (cm/s)
ML	Silt sableux (classification USCS)
M_s	Masse de sol solide (g)
N	Nombre de coups de l'essai SPT
N/D	Non disponible
N.C.	Normalement consolidé
O.C.	Surconsolidé (<i>Over Consolidated</i>)
OCR	Rapport de surconsolidation (<i>Over-Consolidation Ratio</i>)
q_c	Résistance en pointe du cône (kPa)
q_{c1N}	Résistance en pointe du cône normalisée (kPa)

$q_{c\text{-théorique}}$	Résistance en pointe obtenue avec la relation Chen et Juang (1996) (kPa)
q_t	Résistance totale corrigée en pointe du cône (kPa)
q_{tIN}	Résistance totale en pointe normalisée (kPa)
Q_{tn}	Résistance en pointe normalisée (kPa)
S_u	Résistance non drainée (kPa)
SBT	Classification par type de comportement des sols (<i>Soil Behavior Type</i>)
SCG	Société canadienne de géotechnique
SCPT	Essai du piézocône sismique (<i>Seismic Cone Penetration Test</i>)
SCPTu	Essai du piézocône sismique avec lecture de dissipation de pression interstitielles
SM	Sable silteux (classification USCS)
SPT	Essai de pénétration standard (<i>Standard Penetration Test</i>)
T	Température (°C)
u	Pression interstitielle (kPa)
u_0	Pression d'eau hydrostatique (kPa)
u_e	Pression d'eau en excès (kPa)
u_m	Pression interstitielle due à la pénétration du cône (kPa)
U	Degré de consolidation (%)
U.C.	Sous-consolidé (<i>Under Consolidated</i>)
USCS	Système de classification unifiée des sols (<i>Unified Soil Classification System</i>)
V_s	Vitesse des ondes de cisaillement (m/s)
V_{s1}	Vitesse des ondes de cisaillement normalisée (m/s)
w	Teneur en eau massique (%)
w_L	Limite de liquidité (%)
w_{opt}	Teneur en eau optimale (obtenue à partir du test Proctor)

w_p	Limite de plasticité (%)
z	Profondeur (m)
ϕ'	Angle de frottement interne effectif (°)
ρ	Masse volumique totale (kg/m^3)
ρ_d	Masse volumique sèche (kg/m^3)
γ	Poids volumique total (kN/m^3)
γ_d	Poids volumique sec (kN/m^3)
γ_w	Poids volumique de l'eau (9.81 kN/m^3)
σ'_N	Contrainte verticale effective dans les paramètre Mohr-Coulomb (kPa)
σ_{vo}	Contrainte verticale totale (kPa)
σ'_{vo}	Contrainte effective verticale (kPa)
$\sigma'_{v\text{-moy}}$	Contrainte effective verticale moyenne (kPa)
σ_h	Contrainte horizontale moyenne (kPa)
τ	Résistance en cisaillement (kPa)
ν	Coefficient de Poisson

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 – RÉSULTATS DEES ESSAIS CONVENTIONNELS EN LABORATOIRE.....	115
ANNEXE 2 – PHOTOS DE L’APPAREIL CPT EN LABORATOIRE.....	121
ANNEXE 3 – RÉSULTATS DE PÉNÉTRATION AU CÔNE EN LABORATOIRE.....	125
ANNEXE 4 – DONNÉES DE TERRAIN – SCPT16-67	126
ANNEXE 5 – VALIDATION DES CORRÉLATIONS POUR LES RÉSIDUS MINIERES.....	152
ANNEXE 6 – RÉSULTATS CPT _u SUR LE TERRAIN DE 2013	158
ANNEXE 7 – RÉSULTATS CPT _u ET SCPT _u SUR LE TERRAIN DE 2016.....	161
ANNEXE 8 – PARAMÈTRES DE CARACTÉRISATION DES CPT _u DE 2013	168
ANNEXE 9 – PARAMÈTRES DE CARACTÉRISATION DES CPT _u ET SCPT _u DE 2016...	183
ANNEXE 10 – CONDITIONS <i>IN SITU</i> DES RÉSIDUS DES CPT _u DE 2013	203
ANNEXE 11 – CONDITIONS <i>IN SITU</i> DES RÉSIDUS DES CPT _u ET SCPT _u DE 2016.....	206

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Généralités

La stabilité des parcs à résidus miniers est une préoccupation majeure de l'industrie minière et des consultants en ingénierie. Elle dépend des caractéristiques des digues de rétention et de la fondation, des caractéristiques et du comportement des résidus retenus ainsi que des charges appliquées. Des incertitudes considérables sont présentes dans l'évaluation de la stabilité de tels parcs à résidus. Celles-ci sont en partie attribuables à la nature évolutive des propriétés des résidus au cours de leur cycle de vie, ainsi qu'aux manques de compréhensions et aux interprétations parfois erronées des conditions *in situ*. Les résidus des mines de roche dure sont constitués de silt non plastique et de sable fin et sont généralement déposés hydrauliquement dans les parcs à résidus. Par conséquent, ils ont tendance à être stratifiés, lâches et saturés, ce qui les rends particulièrement sensibles à la liquéfaction statique ou dynamique (James, 2009). Les résidus tendent à se comporter différemment des sols naturels de graduation similaire, de sorte que l'applicabilité des corrélations existantes reliant les résultats d'essais *in situ* et les propriétés de ce matériau est incertaine.

L'essai de pénétration au cône (CPT et ses dérivés) est une méthode d'essai *in situ* qui permet de déterminer plusieurs caractéristiques des sols à partir de différentes mesures obtenues de façon instantanée et en continue durant l'enfoncement de la sonde. Ces mesures sont la résistance en pointe, la friction sur le manchon et la pression interstitielle. Il est également possible d'obtenir la vitesse des ondes de cisaillement et la pression interstitielle à l'équilibre à des profondeurs choisies. Comparativement aux essais conventionnels en laboratoire et *in situ*, le CPT s'est révélé efficace, rapide, économique et précis pour la caractérisation des sols naturels, normalement consolidés ou surconsolidés (Mayne, 2013). Dans le cas des résidus miniers, l'applicabilité des corrélations existantes reliant les mesures du CPT et les propriétés géotechniques du matériau n'est toutefois pas confirmée.

1.2 Objectifs du projet de recherche

Les propriétés géotechniques et hydrauliques des résidus provenant de la mine Canadian Malartic ont été étudiées en laboratoire dans des travaux antérieurs par, entre autres, Poncelet (2012), Bolduc (2012), Contreras (2013), Essayad (2015), Grimard et al. (2017) et Archambault-Alwin et al. (2017a). Cette recherche présente une étude en laboratoire d'essais de pénétration au cône, ainsi que la vérification et la calibration des corrélations existantes pour déterminer les propriétés géotechniques des résidus miniers à l'aide du CPT. Pour réaliser ces essais CPT en laboratoire, le montage de simulation CPT développé à l'Université de Sherbrooke a été utilisé (Ghali et al., 2015). Celui-ci est semblable à un œdomètre équipé d'un cône de taille standard et d'une cellule instrumentée de 340 mm de diamètre et 500 mm de hauteur.

Une étude des conditions géotechniques des résidus de la mine Canadian Malartic, située en Abitibi, au Québec, complète également ce mémoire. Grâce à la collaboration de la compagnie Golder Associés, il a été possible d'obtenir des résultats de plusieurs essais CPTu et SCPTu réalisés dans le parc à résidus de la mine Canadian Malartic en 2013 et 2016.

Les objectifs spécifiques de cette recherche sont les suivants :

- Évaluer en laboratoire les propriétés géotechniques des résidus miniers à l'aide d'essais conventionnels et les comparer avec celles de la littérature;
- Évaluer, à l'aide du montage de simulation CPT en laboratoire, les valeurs maximales de la résistance en pointe et du frottement sur le manchon à des contraintes effectives verticales choisies;
- Valider l'applicabilité des corrélations existantes développées pour des sols naturels sur les résidus miniers du site de Canadian Malartic;
- Calibrer, si possible, les corrélations existantes pour obtenir des résultats concordant avec les propriétés des résidus connues;
- Développer une méthodologie pour l'analyse des essais CPTu de terrain;
- Analyser les données de terrain à l'aide des corrélations calibrées pour acquérir une meilleure compréhension de la condition des résidus à court et à long terme ainsi que pour améliorer les analyses de stabilité statique et dynamique du parc à résidus de Canadian Malartic.

1.3 Méthodologie et contenu du mémoire

Les incertitudes reliées à la nature évolutive des propriétés des résidus et aux conditions *in situ* rendent l'évaluation de la stabilité des parcs à résidus difficile et inexacte. À cause de la méthode de déposition, les résidus sont stratifiés, saturés et initialement très lâches ce qui les rends sensibles à la liquéfaction statique et dynamique (James, 2009). Dans le but de diminuer ces incertitudes, cette recherche vise à caractériser les résidus miniers à l'aide de l'essai de pénétration au cône qui peut être répété d'une année à l'autre et ainsi observer l'évolution des caractéristiques des résidus miniers.

Dans le cadre de ce travail, une évaluation en laboratoire des propriétés géotechniques des résidus miniers de la mine Canadian Malartic, à l'aide d'essais conventionnels, permet de confirmer si elles sont semblables à celles de résidus de mines en roche dure et si elles sont similaires aux propriétés des résidus miniers de la même mine étudiés dans les années antérieures. Il est important de noter que les résidus utilisés dans cette recherche ont été recueillis à la sortie du concentrateur pour éviter la ségrégation qui est typiquement observé à la suite de la déposition dans le parc à résidus.

Ensuite, l'applicabilité des corrélations existantes développées pour des sols naturels sur les résidus miniers de la mine Canadian Malartic est validée dans ce travail. Ces corrélations sont appliquées sur les résultats d'essais effectués en laboratoire à l'aide d'un appareil de simulation CPT ainsi que sur les données des essais CPTu et SCPTu effectués sur le terrain. Les propriétés obtenues avec ces corrélations sont alors comparées aux propriétés connues des résidus déterminées à l'aide d'essais conventionnels en laboratoire. Pour pouvoir approximer les valeurs des contraintes effectives qui sont nécessaires dans l'application de plusieurs corrélations, l'hypothèse que la pression interstitielle est hydrostatique est employée à défaut de connaître les valeurs réelles *in situ*.

Par la suite, une des corrélations qui démontre sa validité pour les résidus miniers normalement consolidés en laboratoire a permis de calculer les contraintes effectives et les pressions interstitielles *in situ*. Celles-ci permettent donc de calibrer les autres corrélations, en tenant en compte des conditions *in situ* réelles, et ainsi obtenir des résultats concordant avec les propriétés connues des résidus.

À l'aide des nouvelles corrélations calibrées pour les résidus miniers de la mine Canadian Malartic, il est possible d'analyser les données des essais CPTu et SCPTu et de déterminer les propriétés et caractéristiques de ces résidus. Il est également possible d'observer l'évolution des caractéristiques dans le temps (de 2013 à 2016). Cela s'avère particulièrement utile pour évaluer l'influence de la proximité des inclusions sur la dissipation des pressions interstitielles et sur les propriétés des résidus miniers. Ce travail permet donc d'acquérir une meilleure compréhension du comportement des résidus à court et à long terme ainsi que d'améliorer les analyses de stabilité statique et dynamique du parc à résidus.

Ce mémoire est divisé en sept chapitres. Le présent introduit la problématique et les incertitudes entourant la stabilité des parcs à résidus, présente les objectifs spécifiques et la méthodologie de cette recherche. Le deuxième chapitre présente la revue de littérature incluant une introduction des types de rejets miniers, les défis de l'industrie minière ainsi que les caractéristiques des résidus miniers. Ce chapitre présente également une introduction aux essais CPT et les corrélations entre les paramètres mesurés lors de ces essais et les propriétés géotechniques des sols et des résidus miniers. Le troisième chapitre présente une description du site de la mine Canadian Malartic et les caractéristiques des résidus miniers de cette mine. Le quatrième chapitre présente les équipements, la méthodologie des essais conventionnels en laboratoire ainsi que les résultats obtenus. Il inclue également la méthodologie et les résultats des essais CPT en laboratoire ainsi que les essais CPTu et SCPTu de terrain effectués en 2013 et 2016. Le cinquième chapitre présente l'analyse des résultats des essais en laboratoire, la validation des corrélations existantes et leur calibration pour déterminer les conditions géotechniques des résidus du parc de la mine Canadian Malartic en 2016. Le sixième chapitre présente une analyse de l'effet des inclusions sur les résidus et une étude de l'évolution des conditions géotechniques de 2013 à 2016. Le septième chapitre conclue ce mémoire en rappelant les objectifs et les conclusions de ce travail. Il souligne également la contribution de ce projet pour répondre aux préoccupations de l'industrie minière et pour l'avancement des connaissances dans le domaine.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Les rejets miniers, leur gestion et les défis de l'industrie minière

L'exploitation minière produit différents types de rejets sous forme solide et liquide. Les rejets miniers solides peuvent être séparés en deux grandes catégories : les stériles et les résidus miniers. Ces rejets et leur méthode d'entreposage en surface sont illustrés sur la Figure 2-1.



(a)

(b)

Figure 2-1 : Entreposage des rejets miniers solides à la mine Canadian Malartic (photos prises en juin 2016); (a) haldes à stériles, (b) parc à résidus

Les roches stériles sont les rejets obtenus à partir du dynamitage du massif rocheux pour avoir accès à la zone minéralisée. Ce matériau pulvérulent varie généralement entre la taille de silt (de moins de 80 μm) et de blocs de plus d'un mètre de diamètre et possède une granulométrie très étalée (Aubertin et al., 2002). Ce matériau, dont la valeur économique est nulle ou très faible, peut être utilisé comme matériau de construction pour les ouvrages de surface. Cependant, les stériles sont le plus fréquemment entreposés dans des empilements appelés « haldes à stériles » qui sont illustrées sur la Figure 2-1 (a). Ces amoncellements peuvent atteindre des centaines de mètres de hauteur, particulièrement dans les mines à ciel ouvert (Aubertin, 2011). Comme il est difficile de caractériser les roches stériles et que leurs caractéristiques sur le terrain sont très hétérogènes, la conception ainsi que la construction des haldes peuvent être complexes (Aubertin, 2011). En effet, les comportements géotechniques, hydrogéologiques et géochimiques des haldes doivent être étudiés et pris en considération lors de la construction de ces empilements pour éviter

des instabilités de ces ouvrages ou la génération de drainage minier acide (DMA) ou drainage neutre contaminé (DNC).

Pour leur part, les résidus miniers proviennent du concentrateur où il y a extraction du minéral ayant une valeur économique. Ces rejets sont composés de roches finement broyées pour atteindre la taille de silt et de sable. Ceux-ci sont transportés sous forme de pulpe du concentrateur jusqu'au parc à résidus comme l'illustre la Figure 2-1 (b). Il est aussi possible de les utiliser sous forme de remblai hydraulique ou remblai en pâte cimentée dans les ouvertures souterraines (Essayad, 2015). Considérant le volume énorme de résidus produit durant la durée de vie d'une mine, leur entreposage soulève de nombreux défis pour l'industrie minière. En effet, les résidus ont des caractéristiques géotechniques complexes et variables dans le temps, ce qui rend l'analyse de leur comportement difficile et inexacte (Aubertin, 2011, Grimard et al, 2017). De plus, les résidus miniers sont particulièrement susceptibles à la liquéfaction (perte de résistance) statique et dynamique à cause de leur saturation et leur faible densité (Aubertin, 2011; Contreras, 2013). Par ailleurs, la dissipation lente des pressions interstitielles en excès fait en sorte que les résidus miniers demeurent dans un état sous-consolidé durant de nombreuses années (James, 2009).

Les entreprises minières sont aujourd'hui conscientes des risques associés aux ruptures des ouvrages de confinement des résidus miniers. Cependant, un nombre important d'incidents sont recensés annuellement à l'échelle nationale et internationale. En plus des dommages économiques, environnementaux et des pertes de vie, ces événements ont pour effet d'entacher l'image de l'industrie minière (James, 2009; Aubertin, 2011). L'évaluation de la stabilité des ouvrages est cruciale pour assurer leur intégrité et pour protéger la population, les infrastructures ainsi que l'environnement à proximité des mines. Il a été démontré au cours de plusieurs études de cas que la stabilité des digues peut être compromise par trois principales causes de rupture : l'effet d'événements extrêmes (fortes précipitations, séismes, etc.), l'instabilité des fondations ou de la digue et l'effet de la variation des propriétés des résidus retenus (particulièrement pour les digues construites en méthode amont) et des ouvrages (James, 2009; Aubertin, 2011). Les causes spécifiques de rupture sont, par exemple, le débordement en crête de la digue, des surpressions interstitielles trop importantes causant des instabilités, l'érosion interne ou l'érosion de surface de la digue, l'instabilité des pentes causée par des sollicitations statiques ou dynamiques, la liquéfaction des résidus et le tassement excessif ou la rupture en cisaillement de la fondation

(Contreras, 2013; Aubertin, 2011; James & Aubertin, 2016). Les analyses de stabilité doivent donc inclure une multitude de scénarios avec plusieurs variables pour tenter de prédire le comportement des ouvrages et s'assurer que leur conception soit appropriée pour garantir leur longévité.

2.2 Les résidus miniers

Les résidus miniers peuvent provenir de deux types de mines : les mines en roche dure et les mines en roche molle. Le charbon et le schiste bitumineux, par exemple, proviennent de roches sédimentaires dites « molles » (de la Vergne, 2014). Généralement, les métaux tel que l'or, le fer et le cuivre se retrouvent dans les roches ignées ou métamorphiques qui sont plus dures que les roches sédimentaires. En général, les mines exploitants les métaux sont donc qualifiées comme étant des « mines en roche dure » (de la Vergne, 2014). Dans le cadre de ce travail portant sur les résidus de la mine d'or Canadian Malartic, seulement les caractéristiques des résidus de mines en roche dure seront présentées dans les sections suivantes.

2.2.1 Caractéristiques des résidus de mines en roche dure

Plusieurs études ont été menées pour caractériser les propriétés des rejets de mines en roche dure. Deux importantes publications sur le sujet ont été réalisées par Bussière (2007) et Qiu et Sego (2001), qui ont analysé des rejets de plusieurs mines exploitant différents métaux au Canada ainsi qu'à l'étranger. Les propriétés des résidus déterminées dans ces deux publications sont résumées dans le Tableau 2-1.

Les résidus miniers sont généralement transportés dans des conduits au parc à résidus, tel qu'illustré sur la Figure 2-2, et déposés hydrauliquement sous forme de pulpe avec une teneur en solides initiale entre 25 et 45% (Bussière, 2007). Cette méthode de déposition fait en sorte que les résidus sont initialement très lâches et ont une tendance à ségréger. Effectivement, les particules plus grossières créent une plage près de la zone de déversement et les particules fines sont transportées par l'eau vers le centre du parc (Bussière, 2007). La dessiccation peut également être remarquée sur la Figure 2-2. Celle-ci consiste en l'assèchement des résidus à la surface, créant ainsi des fissures et des croûtes de résidus raides et surconsolidés. Les phénomènes de la ségrégation ainsi que la dessiccation rendent les résidus miniers très hétérogènes et stratifiés.

Tableau 2-1 : Propriétés géotechniques des résidus miniers provenant de mines en roche dure
(modifié de Contreras, 2013)

Paramètres	Bussière (2007)		Qiu et Sego (2001)		
	Canada	Québec	Cuivre	Or	Résidus consolidés
D_{10} (mm)	0.001 à 0.004	0.001 à 0.006	0.016	0.005	0.003
D_{60} (mm)	0.01 à 0.05	0.01 à 0.08	0.153	0.054	0.204
C_U	8 à 18	10 à 30	9.4	10.8	75.6
Passant 0.002 mm (%)	5 à 14	4 à 20	1.3	5.3	8.9
Passant 0.08 mm (%)	70 à 97	60 à 100	31.3	81.3	21.2
w_{opt} (%)	10 à 20		N/D	N/D	N/D
$\gamma_{d\ max}$ (kN/m ³)	14.6 à 20.1		N/D	N/D	N/D
Limite de liquidité w_L	< 40		N/D	N/D	N/D
Limite de plasticité w_p	0 à 15		N/D	N/D	N/D
Classification USCS	ML	ML ou SM	SM	ML	SM
D_r	2.6 à 2.9 (minerai des veines de quartz) 2.9 à > 4.5 (résidus sulfureux)		2.75	3.17	2.6
	Résidus ML	Résidus SP			
C_c (indice de compression)	0.05 à 0.3	0.05 à 0.3	0.056 à 0.094	0.083 à 0.156	0.271 à 0.319
c_v (cm ² /s)	0.001 à 0.1	0.1 à 100	0.007 à 0.0033	0.004 à 0.025	0.00009 à 0.0026
K_{sat} (cm/s)	10^{-4} à 10^{-6}	10^{-2} à 10^{-4}	4.5^{-5} à 9.8^{-5}	2.6^{-5} à 6.7^{-5}	2.2^{-7} à 6.3^{-7}
Ψ_a (kPa)	10 à 70	5 à 12.5	5	6	6
Ψ_r (kPa)	550 à 800	< 300	N/D	N/D	N/D
C' (kPa)	0	0	0	0	3
ϕ' (°)	30 à 42	30 à 42	34	33	30
C (kPa)	0 à 100	0 à 100	N/D	N/D	N/D
ϕ (°)	14 à 25	14 à 25	N/D	N/D	N/D

N/D – Non déterminé



Figure 2-2 : Déposition hydraulique des résidus miniers (photo prise en juin 2016)

2.2.1.1 Densité relative des grains et poids volumique

La densité relative des grains D_r est une propriété dépendante de la minéralogie de la roche mère. Pour les exploitations en roche dure, la densité relative des grains des résidus se trouve généralement entre 2.6 et 4.0 (Aubertin, 2011). Dans les mines d'or, la minéralogie des résidus consiste principalement en du quartz, ce qui fait en sorte que le D_r se situe entre 2.6 et 2.9 (Bussière, 2007). Le poids volumique sec γ_d des résidus varie généralement entre 11.5 et 18 kN/m³ pour les valeurs de D_r entre 2.6 et 2.9 (Aubertin, 2011).

2.2.1.2 Granulométrie, plasticité et classification

Les résidus miniers provenant de mines en roche dure sont constitués majoritairement de silt et sable fin. La Figure 2-3 démontre la variabilité de la granulométrie des résidus provenant de différents sites miniers. Le D_{10} varie entre 0.001 et 0.004 mm, alors que le D_{60} est entre 0.01 et 0.05 mm. Le coefficient d'uniformité C_U de ces sols est compris entre 8 et 18, indiquant que les résidus sont étalés (Bussière, 2007). Les déterminations des limites d'Atterberg effectuées sur les résidus de mines en roche dure démontrent que ceux-ci sont faiblement plastiques à non plastiques. En effet, la limite de liquidité w_L est généralement plus petite que 40 et la limite de plasticité w_P , lorsqu'il est possible de la mesurer, est entre 0% et 15% (Bussière, 2007). Basé sur

la méthode de classification USCS (Unified Soil Classification System), les résidus présentés sur la Figure 2-3 sont des silts sableux de faible plasticité (ML).

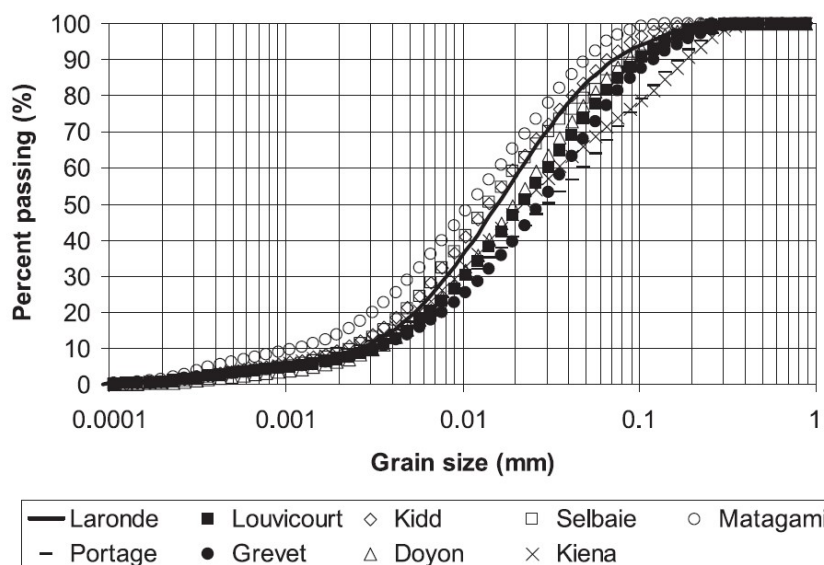


Figure 2-3 : Granulométrie de résidus miniers provenant de diverses mines en roche dure du Canada (Bussière, 2007)

Un élément important à noter concernant la granulométrie de résidus miniers est sa grande variabilité. En effet, la granulométrie peut être très variable en raison du procédé d'extraction du minerai comme l'indique la Figure 2-4 qui présente les résultats obtenus sur 13 échantillons recueillis directement à la sortie du concentrateur d'une mine. Ces résultats indiquent que le D_{10} varie entre 0.0009 et 0.006 mm et le D_{60} varie entre 0.01 et 0.08 mm. De plus, en raison de la méthode de déposition, les fines peuvent être entraînées par l'eau du point de déversement vers le centre du parc à résidus causant ainsi un changement dans la granulométrie des résidus déposés. Après la déposition de ces résidus, leur classification USCS est un silt non plastique (ML) pour la fraction fine ou un sable silteux (SM) pour la fraction grossière dépendamment de leur éloignement du point de déversement (Bussière, 2007). Puisque les propriétés géotechniques et hydrauliques dépendent notamment de la granulométrie du matériau, il est difficile de caractériser les résidus et de prévoir leur comportement hydrogéotechnique à court et à long terme.

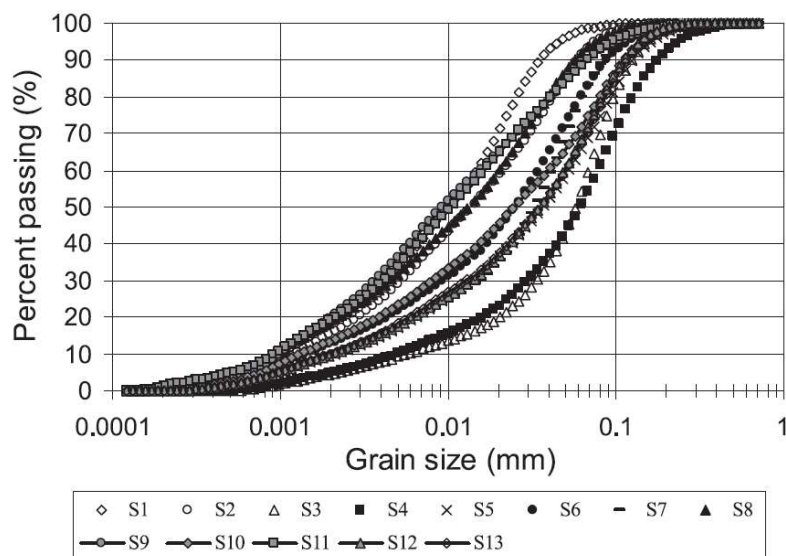


Figure 2-4 : Hétérogénéité de la granulométrie de résidus miniers provenant de la même mine avant leur déposition dans le parc à résidus (Bussière, 2007)

2.2.1.3 Indice de densité relative

Une fois les résidus miniers déposés dans le parc à résidus, leur indice des vides e varie typiquement entre 0.6 et 1.7 pour la fraction fine ($D < 0.075$ mm) et entre 0.6 et 0.9 pour la fraction grossière ($D \geq 0.075$ mm) (Aubertin, 2011). L'indice de densité relative I_D associé à ces indices des vides est grandement inférieur à 50 %, parfois aussi petit que 10 %, ce qui démontre l'état très lâche des résidus (Aubertin, 2011).

2.2.1.4 Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique k est une propriété dépendante de la granulométrie, de la plasticité ainsi que de l'indice des vides d'un sol. Cette valeur est importante pour comprendre le comportement du sol en consolidation, les conditions d'écoulement des eaux et des contaminants à travers les digues ou dans les eaux souterraines (Bussière, 2007). La conductivité hydraulique saturée k_{sat} varie énormément pour des résidus miniers déposés hydrauliquement. En effet, la méthode de déposition fait en sorte qu'il y a ségrégation des particules, ce qui cause une variation latérale et verticale de la conductivité hydraulique dans le bassin. Il est aussi accepté que la conductivité hydraulique horizontale k_h peut être de 10 à 100 fois supérieure que la conductivité verticale k_v ; elle est donc anisotrope (Aubertin, 2011). Il est important de noter que les valeurs de

conductivité hydraulique obtenues en laboratoire ne sont pas tout à fait représentatives de celles sur le terrain car les échantillons en laboratoire sont habituellement homogènes et isotropes. En général, pour des résidus provenant de mines en roche dure, k_{sat} obtenu en laboratoire se trouve entre 10^{-4} et 10^{-2} cm/s pour la fraction grossière et entre 10^{-6} et 10^{-4} cm/s pour la fraction fine (Bussière, 2007).

2.2.1.5 Paramètres de consolidation

Lors d'essais de consolidation, il a été remarqué que l'indice de compressibilité C_C se trouve entre 0.10 et 0.30 pour les résidus ayant une haute teneur en particules fines et entre 0.05 et 0.15 pour les résidus plus grossiers. Également, pour les fractions fines, le coefficient de consolidation c_v se trouve entre 10^{-3} et 10^{-1} cm²/s et, pour les fractions grossières, c_v est plus grand que 10^{-1} cm²/s (Aubertin, 2011; Bussière, 2007). Tout comme pour la conductivité hydraulique, les essais de consolidation en laboratoire sont faits avec des échantillons homogènes, ce qui fait en sorte que les résultats obtenus ne sont pas tout à fait représentatifs de ce qui peut être remarqué sur le terrain. Ces essais donnent quand même une bonne indication du comportement des résidus miniers. C'est durant le processus de consolidation que les résidus gagnent en résistance, cependant, même une fois consolidés sous leur propre poids, les résidus ont démontré avoir une faible résistance en cisaillement et sont quand même sujet au phénomène de liquéfaction (Bussière, 2007).

2.2.1.6 Paramètres de résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement drainé d'un sol est contrôlée par l'angle de frottement interne effectif ϕ' et la cohésion effective c' . Pour la même densité, l'angle de frottement interne effectif de résidus miniers est généralement plus grand que celui de sols naturels ayant une même granulométrie et ce, en raison de la dureté et l'angularité des particules (Vick, 1990). Divers essais en laboratoire ont déterminé que ϕ' des résidus miniers est compris entre 33 et 41° pour la fraction grossière et entre 30 et 37° pour la fraction fine (Aubertin, 2011). Généralement, la valeur de la cohésion effective c' des résidus est pratiquement nulle. Toutefois, à court terme, la résistance au cisaillement non drainé S_u de certains résidus peut parfois atteindre une valeur de l'ordre de 100 kPa (Bussière, 2007).

2.3 Essais de pénétration au cône

2.3.1 Introduction

Plusieurs méthodes existent pour caractériser des sols, que ce soit en laboratoire ou *in situ*. Lorsqu'il est question de caractériser des résidus miniers, une approche traditionnelle d'échantillonnage et d'essais en laboratoire n'est pas efficace considérant la grandeur d'un parc à résidus et le petit volume d'échantillons représentatifs qui peut être extrait avec succès. De plus, il est couramment admis qu'il est difficile d'obtenir un échantillon intact de sols sans cohésion (Shuttle & Cuning, 2007). Des essais *in situ* sont donc préférables. Divers critères sont considérés dans la sélection du type d'essai *in situ* à effectuer pour déterminer les conditions de terrain. Ces critères sont l'applicabilité et la répétitivité de l'essai, la qualité et la continuité des données recueillies, ainsi que les coûts rattachés à cet essai (Mayne, 2013). Plusieurs types d'essais *in situ* conventionnels tels que l'essai de pénétration standard (SPT), l'essai scissométrique de chantier et l'essai pressiométrique existent pour déterminer diverses caractéristiques et propriétés mécaniques des sols (Société Canadienne de Géotechnique [SCG], 2013). Malheureusement, ces essais s'avèrent être coûteux et ne sont pas tous applicables sur des sols mous et saturés comme les résidus miniers. Par exemple, le SPT donne souvent des valeurs de N (nombre de coups pour une pénétration de 300 mm) égales à zéro lorsque utilisé dans des parcs à résidus car le SPT s'enfonce sous son propre poids à cause de la très faible résistance de ceux-ci. Ce résultat n'offre donc pas une mesure pratique pour évaluer les propriétés des résidus. De plus, ces essais conventionnels de terrain ne permettent pas tous une lecture en continue de paramètres dont la mesure de la pression interstitielle *in situ*.

Une alternative économique et rapide aux essais conventionnels de terrain mentionnés plus haut est l'essai de pénétration au cône électrique (CPT) et ses dérivés. Le piézocône (CPTu) permet la lecture des pressions interstitielles u en plus de la résistance totale en pointe q_c et du frottement local sur le manchon f_s . Le piézocône sismique (SCPTu) permet aussi la lecture de la vitesse des ondes de cisaillement, V_s , mesurée typiquement à des intervalles de 1 m. Par ailleurs, le piézocône peut être utilisé pour réaliser des essais de dissipation de pressions interstitielles pour déterminer la conductivité hydraulique des sols en place (Mayne, 2013). Un autre avantage à utiliser le CPT et ses dérivés est que ces lectures sont mesurées indépendamment, instantanément et en continue (sauf la lecture de V_s qui est mesurée typiquement à des intervalles de 1 m) durant

l'enfoncement de la sonde sans nécessiter un échantillonnage. Cependant, un désavantage à cet essai est qu'il n'est pas possible d'échantillonner le sol, si désiré, c'est pourquoi le CPT donne des informations complémentaires au SPT (qui lui permet l'échantillonnage). La sonde est connectée par un câble à un ordinateur permettant de visualiser et d'évaluer instantanément les données sur le terrain, ce qui est particulièrement appréciable si des décisions rapides doivent être prises (Mayne, 2013). L'essai de pénétration au cône peut être effectué dans les sols mous tout comme les sols denses, cependant, le type de cône varie en fonction de la compacité et la grosseur de particules du sol. Un schéma d'un cône sismique typique est présenté sur la Figure 2-5 et les différents types de cônes sont montrés sur la Figure 2-6.

La sonde est cylindrique avec un bout conique émoulu possédant un angle au sommet généralement de 60° et la pointe standardisée ayant une aire égale à 10 cm^2 ainsi qu'un manchon de 150 cm^2 (diamètre de 35.7 mm et une hauteur de 134 mm) (Mayne, 2013). Le diamètre et la longueur du cône peuvent varier (voir Figure 2-6). Leurs dimensions dépendent du type de sol à tester et de sa stratification; pour les sols très stratifiés (ayant de minces couches de différents sols) et fins telles que les argiles, un cône plus petit sera utilisé alors qu'un cône plus large sera requis pour réussir à pénétrer un sol grossier. La capacité typique du système hydraulique enfonçant le cône dans le sol est de 20 tonnes (Mayne, 2013).

Le cône contient divers capteurs pour mesurer la force axiale en pointe, la friction à l'aide d'un manchon le long du fût, la pression interstitielle et l'inclinaison lors de sa pénétration dans le sol à une vitesse constante de généralement 20 mm/s. Basée sur les normes de l'ISSMGE (*International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*), cette vitesse peut varier de plus ou moins 5 mm/s alors que basé sur les normes de la SCG, elle peut varier de plus au moins 2 mm/s (Meigh, 2013; SCG, 2013).

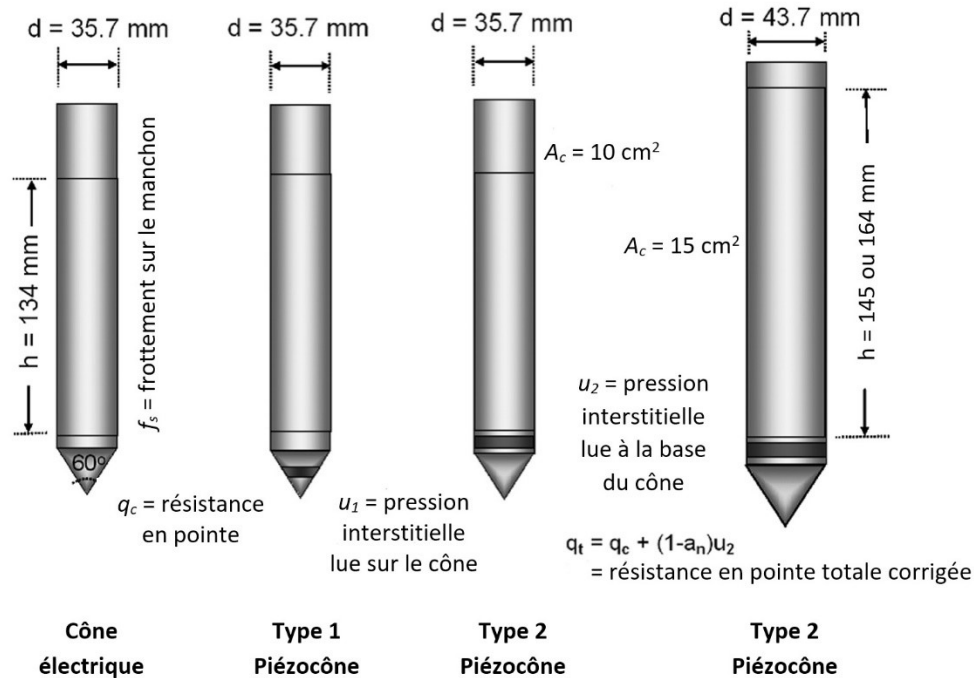


Figure 2-5 : Schéma de différents types de cônes (Lunne et al., 1997)



Figure 2-6 : Famille des cônes utilisés dans l'industrie et la recherche (Mayne, 2013)

Dans les sols où il y a de fortes variations en pressions interstitielles tels que les argiles, les silts et les sables argileux, il est recommandé de mesurer la pression interstitielle de pénétration tel qu'indiqué dans l'ASTM D5778 (2007) en réalisant des essais de dissipation. L'essai de dissipation consiste à arrêter le cône à une profondeur désirée et à mesurer la dissipation de la pression interstitielle en excès générée par la pénétration du cône en fonction du temps. Une fois

la pression interstitielle en excès dissipée, la lecture de la pression interstitielle détectée par le cône est égale à la pression interstitielle *in situ* à cette profondeur. Les lectures de pression interstitielle par le cône ont un impact sur la résistance en pointe mesurée par celui-ci (Jaeger, 2012). C'est pourquoi il est important de minimiser la génération de pressions lors de la pénétration. Il a été démontré que pour les sols peu perméables tels que les argiles, une vitesse de pénétration du cône plus petite que 20 mm/s est recommandée (Chai et al., 2016; Kim et al., 2008). Jaeger (2012) indique que si la vitesse de pénétration est trop élevée pour le type de sol, la lecture de la résistance en pointe est obtenue dans des conditions non drainées, alors que si la vitesse est diminuée adéquatement, une lecture de résistance en pointe en milieu drainé est possible. Il est important de noter que la résistance en pointe en condition non drainée est plus petite que celle en milieu drainée. Ainsi, la valeur de la résistance en pointe obtenue à une vitesse de pénétration trop élevée pour le type de sol est sous-estimée (Jaeger, 2012). La correction à apporter à la valeur de la résistance en pointe dépend non seulement de la valeur de la pression interstitielle mesurée, mais aussi de l'emplacement où la lecture de la pression interstitielle est prise (u_m). Pour les cônes de Type 2, qui ont le capteur de pressions interstitielles au-dessus de la pointe, à la base du cône (voir Figure 2-5), cette correction est effectuée à l'aide de l'équation [2-1] tiré de Mayne (2013) :

$$q_t = q_c + (1 - a_{net})u_2 \quad [2-1]$$

où q_t est la résistance totale corrigée en pointe; q_c est la résistance en pointe du cône; a_{net} est le ratio de l'aire net de la pointe (typiquement égal à 0.80) et u_2 est la pression interstitielle mesurée à la position sur le cône de Type 2 (à la base du cône, immédiatement en haut de la pointe).

2.3.2 Corrélations existantes pour le CPT

Des corrélations pour déterminer les caractéristiques et les propriétés des sols à partir d'essais CPT ont été développées depuis plus d'une cinquantaine d'années. Il est important de noter que les relations présentées dans les sections ci-dessous ne représentent pas la totalité des corrélations existantes. Les corrélations présentées dans les sections suivantes, qui ont été trouvées en majorité dans le livre de Mayne (2013), portent sur : la classification des sols, leur teneur en particules fines, leur poids volumique, leur indice de densité relative, leurs paramètres de

résistance au cisaillement, l'indice N de l'essai SPT, la vitesse des ondes de cisaillement et la pression interstitielle.

Ces corrélations, développées sur les sols pulvérulents fins ou d'autres résidus miniers, ont été choisies car, tel que mentionné précédemment, il est admis que les résidus miniers ont des propriétés mécaniques semblables aux sables et ont une gradation similaire à un silt étalé. De plus, les corrélations choisies devaient avoir le potentiel d'être testées en laboratoire avec les instruments et les appareils disponibles. Les relations répondant à ces critères sont résumées ci-dessous.

2.3.2.1 Identification et classification des sols

Grâce aux lectures prises en continue durant l'essai CPT, il est possible de détecter les changements de sol, les zones plus lâches, les lentilles d'argile, de glace ainsi que toutes autres anomalies dans le sol (Mayne, 2013). Des corrélations ont été établies pour classer les sols sur la base des différentes mesures du CPT (q_c , f_s , V_s , u). Contrairement au système de classification unifié des sols (USCS), qui se base sur les propriétés physiques des particules, Robertson (1990) a établi un système de classification basé sur les types de comportements des sols (*Soil Behaviour Type* [SBT]). À partir du système USCS, Robertson a généralisé le comportement des sols grossiers et des sols fins et a utilisé ces généralisations comme la base de son système de classification (Robertson, 2016). Il a déterminé que les sols grossiers ont, en général, une résistance élevée, une compressibilité faible et une perméabilité élevée. Pour les sols fins, il a déterminé qu'ils ont une résistance faible, une compressibilité moyenne à élevée et que leur perméabilité est faible (Robertson, 2016). En étudiant davantage les sols naturels, Robertson a rassemblé de nombreuses caractéristiques des sols et les a ajoutées aux généralisations de base pour créer des catégories de types de comportement (1 à 9 tel qu'indiqué sur la Figure 2-7). Les graphiques de Robertson et al. (1986) et Robertson (1990, 2009, 2016) permettent de classer les sols naturels en fonction du comportement mécanique *in situ* évalué à l'aide du cône et de la pression interstitielle mesurée par cet instrument (Robertson, 2016). Le graphique de classification SBTn (normalisé), le plus récemment modifié par Robertson, est présenté sur la Figure 2-7. L'indice de comportement I_c montré sur la Figure 2-7 a été développé par Davies (1999) et est présenté plus loin dans l'équation [2-5] et sur la Figure 2-8.

La méthode de classification SBTn proposée par Robertson (2009) est basée sur deux paramètres normalisés suivants (Robertson, 2009 et Robertson & Wride, 1998) :

$$Q_{tn} = (q_t - \sigma_{vo}) / \sigma'_{vo} \quad [2-2]$$

$$F_r = [f_s / (q_t - \sigma_{vo})] 100\% \quad [2-3]$$

où Q_{tn} est la résistance en pointe normalisée, q_t est la résistance totale en pointe, σ_{vo} est la contrainte totale *in situ*, σ'_{vo} est la contrainte effective *in situ*, F_r est le rapport de frottement, f_s est la friction sur le manchon.

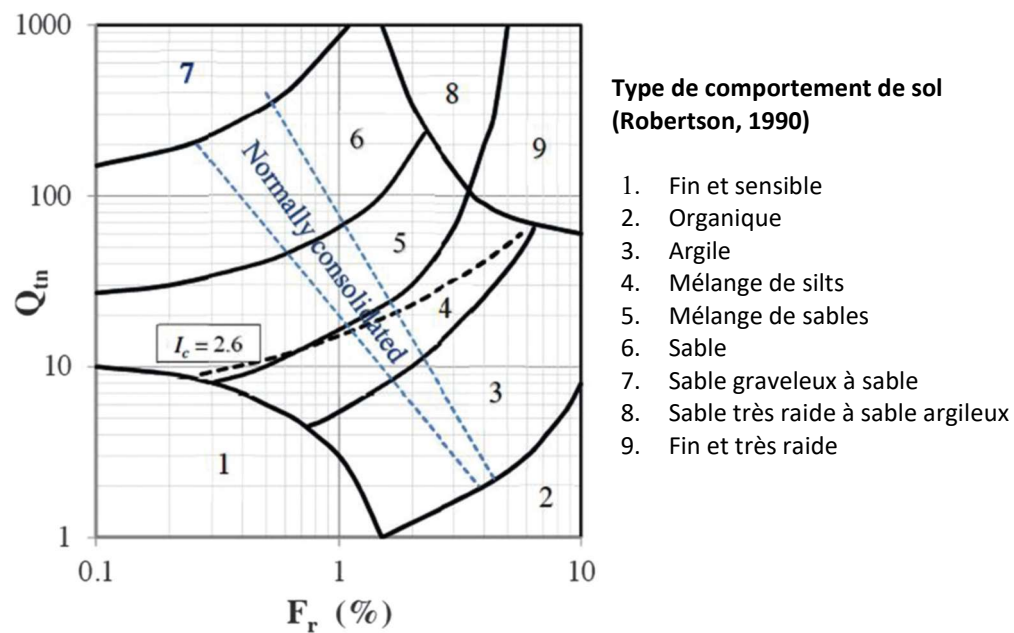


Figure 2-7 : Système de classification SBTn proposé par Robertson (1990) modifié par Robertson (2009)

Davies (1999) présente un graphique permettant la classification du comportement des résidus miniers qui est plus appropriée que celui de Robertson (1990). En effet, il indique que celui de Robertson (1990) n'est pas applicable sur un sol non-naturel aussi fin, sans cohésion et friable, que les résidus, car il n'interprète pas correctement la nature de la consolidation et l'historique de contraintes (Davies, 1999). Le graphique proposé par Davies (1999) inclut les données reliées au drainage durant l'essai de pénétration au cône en introduisant la relation $Q(1 - B_q)$ où Q est égal à Q_{tn} tel que défini par Robertson (1990) dans l'équation [2-2] et B_q est calculé comme suit :

$$B_q = (u_2 - u_0)/(q_t - \sigma_{vo}) \quad \text{avec} \quad u_2 > u_0 \quad [2-4]$$

où B_q représente la pression interstitielle normalisée; u_2 est la pression interstitielle mesurée par le piézocône de Type 2 et u_0 est la pression interstitielle hydrostatique.

L'incorporation des données de pression interstitielle dans la relation $Q(1 - B_q)$ permet de développer plus en détails l'intervalle d'interprétation pour les sols fins sans affecter l'intervalle des sols grossiers. Le graphique de Davies (1999) a été amélioré par Jefferies et Been en 2006 et celui-ci est présenté sur la Figure 2-8.

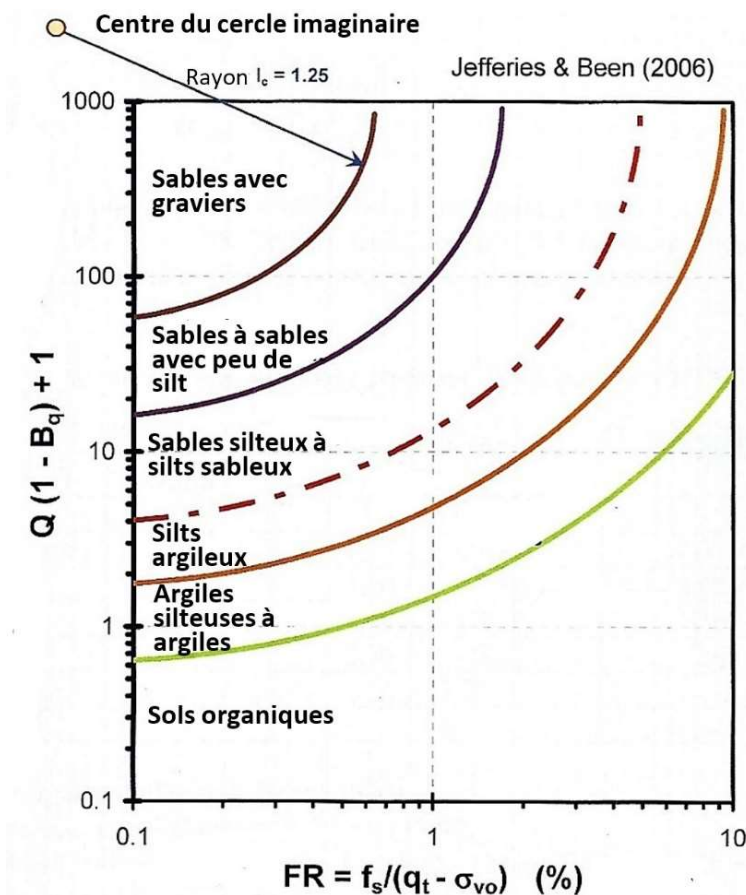


Figure 2-8 : Classification du type de comportement à partir de $Q(1 - B_q)$ et F_r (Mayne, 2013)

Il peut être remarqué sur la Figure 2-8 l'introduction du rayon de cercle imaginaire I_c , communément appelé indice des matériaux ou indice des types de comportement, qui est également présent dans le graphique de Robertson (2009). Sur la Figure 2-8, cet indice délimite les zones de classification basées sur le comportement d'un sol tel que défini par Davies (1999).

Il est calculé à l'aide de l'équation [2-5] ou l'équation [2-6] si des lectures de pressions interstitielles ne sont pas disponibles (Davies, 1999; Robertson & Wride, 1998).

$$I_c = \sqrt{\{3 - \log[Q(1 - B_q)]\}^2 + [1.5 + 1.3(\log F_r)]^2} \quad [2-5]$$

$$I_{cRW} = \sqrt{\{3.47 - \log(Q)\}^2 + \{1.22 + \log(F_r)\}^2} \quad [2-6]$$

Le Tableau 2-2 résume l'intervalle des valeurs de I_c et I_{cRW} pour chaque zone de classification.

Tableau 2-2 : Type de comportement d'un sol basé sur I_c et I_{cRW} (Mayne, 2013)

Classification du sol	Zone SBTn (Robertson, 1990)	I_c (Davies, 1999)	I_{cRW} (Robertson & Wride, 1998)
Sables graveleux	7	$I_c < 1.25$	$I_{cRW} < 1.31$
Sables à sables avec un peu de silt	6	$1.25 < I_c < 1.80$	$1.31 < I_{cRW} < 2.05$
Sables silteux à silts sableux	5	$1.80 < I_c < 2.40$	$2.05 < I_{cRW} < 2.60$
Silts argileux	4	$2.40 < I_c < 2.76$	$2.60 < I_{cRW} < 2.95$
Argiles silteuses à argiles	3	$2.76 < I_c < 3.22$	$2.95 < I_{cRW} < 3.60$
Sols organiques	2	$I_c > 3.22$	$I_{cRW} > 3.60$
Sols sensibles	1	N/A	$I_{cRW} < 0$

2.3.2.2 Teneur en particules fines

Les particules fines sont décrites par le système de classification USCS comme étant d'un diamètre plus petit que 75 μm . Il est utile de connaître la teneur en fines (*Fine Content* [FC]), en particulier pour l'analyse du potentiel de liquéfaction. Les méthodes pour évaluer la teneur en fines à partir de l'essai de pénétration au cône qui sont basées sur F_r , q_c ou la vitesse de dissipation des pressions interstitielles ne sont pas applicables pour les résidus miniers (Davies, 1999). En effet, il a été démontré que la méthode à partir de la vitesse de dissipation n'est pas précise et celle basée sur q_c donnent des corrélations très spécifiques aux sites étudiés. Également, la méthode basée sur le frottement sur le manchon ignore la variation de compacité du sol *in situ* qui mène à des valeurs de teneur en fines dispersées (Davies, 1999).

Par conséquent, une autre méthode pour déterminer la teneur en particules fines a été proposée par Davies (1999) basée sur l'indice des sols. Cette méthode a été développée à l'aide d'une banque de données de CPTu obtenues de différents sites miniers. Une corrélation linéaire a été établie entre la teneur en fines et l'indice I_c tel que défini dans l'équation [2-5]. Cette corrélation est décrite à l'aide des équations suivantes (tirées de Davies, 1999) :

$$\text{Pour } I_c \leq 1.3, FC(\%) = 0 \quad [2-7]$$

$$\text{Pour } 1.3 < I_c < 3.65, FC(\%) = 42.4I_c - 54.9 \quad [2-8]$$

$$\text{Pour } I_c \geq 3.65, FC(\%) = 100 \quad [2-9]$$

2.3.2.3 Poids volumique

Le poids volumique du sol en place γ est utile pour calculer les valeurs des contraintes. Il dépend de plusieurs variables : l'indice des vides, la teneur en eau et la densité relative des grains. Le poids volumique sec peut être calculé à l'aide de l'équation [2-10] et le poids volumique saturé avec l'équation [2-11].

$$\gamma_d = \frac{D_r \gamma_w}{1+e} \quad [2-10]$$

$$\gamma_{sat} = \frac{D_r + e}{1+e} \gamma_w \quad [2-11]$$

où γ_w est le poids volumique de l'eau (9.81 kN/m³).

À l'aide du cône, il est possible d'approximer le poids volumique du sol en place avec les mesures de V_s ou f_s . Les équations [2-12] et [2-13] et la Figure 2-9 tirées de Mayne (2013) démontrent ces corrélations.

$$\gamma = 8.64 \log(V_s) - 0.74 \log(\sigma'_{vo}) - 0.40 \quad [2-12]$$

$$\gamma = 1.95 \gamma_w (\sigma'_{vo} / \sigma_{atm})^{0.06} (f_s / \sigma_{atm})^{0.06} \quad [2-13]$$

où σ_{atm} est égal à 100 kPa et V_s est exprimé en m/s.

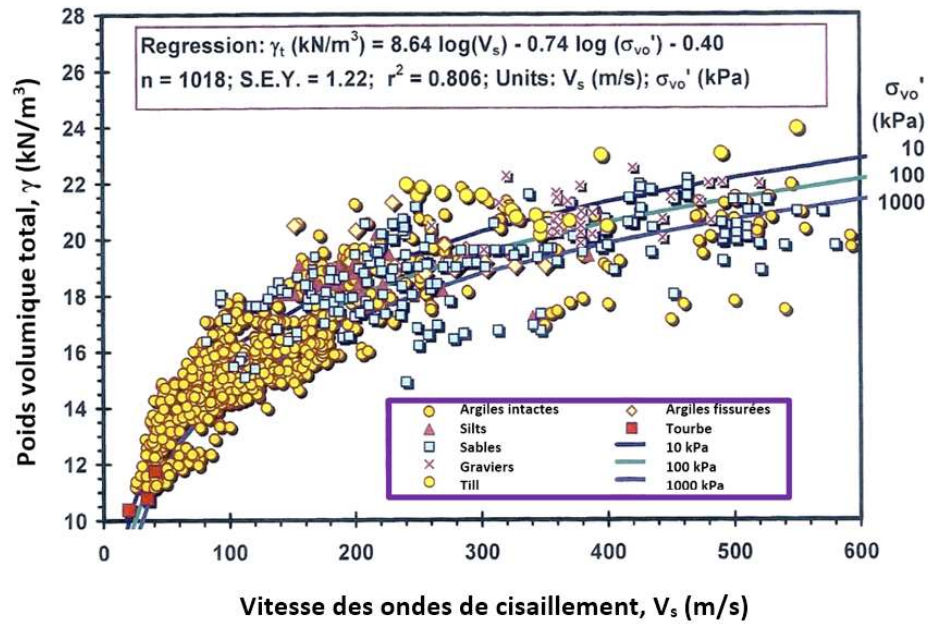


Figure 2-9 : Corrélation entre V_s , γ et σ'_{vo} (Mayne, 2013)

2.3.2.4 Indice de densité relative

Robertson et Campanella (1986) ont établi une corrélation entre la résistance en pointe du cône et l'indice de densité relative I_D pour les sables de quartz normalement consolidés. Cette relation est présentée sur la Figure 2-10.

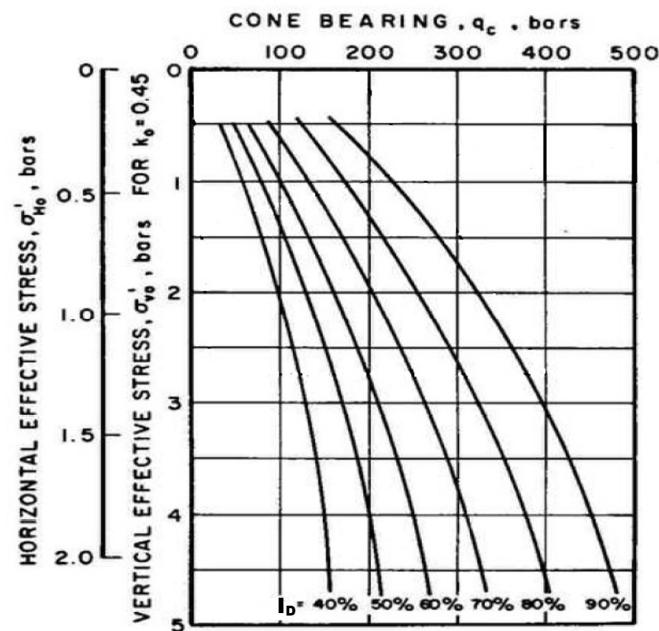


Figure 2-10 : Corrélation entre q_c et I_D (Robertson et Campanella, 1986)

Mayne (2006) a complété des essais en laboratoire pour confirmer une autre corélation pour déterminer I_D , d  velopp  e initialement par Jamiolkowski et al. (2001) sur les sables propres. Cette relation est montr  e sur la Figure 2-11.

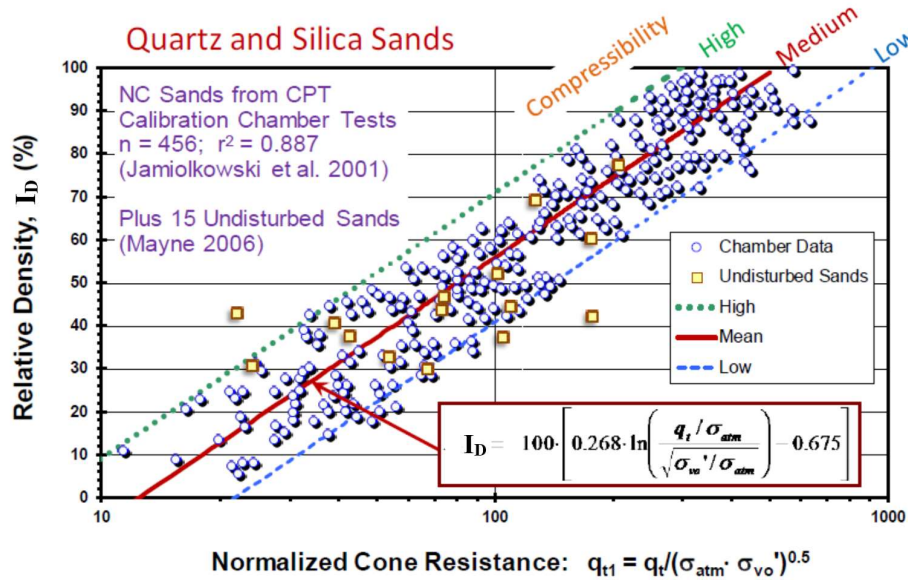


Figure 2-11 : Indice de densité à partir de la résistance en pointe normalisée dans les sables propres normalement consolidés (Mayne, 2006)

2.3.2.5 Résistance au cisaillement non drainé

Il a été démontré que la résistance au cisaillement non drainé S_u d'un sol peut être estim  e à l'aide du CPT. En effet, quelques cor  lations ont été développées pour les sols naturels. En général, il peut être assumé que la résistance au cisaillement non drainé d'un sol remanié est égale à la friction sur le manchon f_s (Mayne, 2013). Dans le contexte des résidus miniers, la valeur de S_u est utilis  e pour estimer la résistance en conditions non drain  es (Buss  re, 2007).

2.3.2.6 Angle de frottement interne effectif

L'angle de frottement interne effectif est une propriété qui contrôle le comportement d'un sol et sa résistance en cisaillement. Le critère de rupture de Mohr-Coulomb décrit la résistance en cisaillement comme suit :

$$\tau = c' + \sigma'_N \tan(\phi') \quad [2-14]$$

où τ est la résistance en cisaillement, c' est la cohésion effective, σ'_N est la contrainte verticale effective et ϕ' est l'angle de frottement interne effective.

Il a été démontré que la cohésion effective ne peut pas être déterminée directement à partir des tests CPT. Par contre, pour des analyses de stabilité, il est convenu d'utiliser un c' égal à zéro (Mayne, 2013).

Des études ont été menées par Kulhawy et Mayne (1990) pour déterminer une corrélation entre l'angle de frottement interne effectif et les mesures de q_t . Malheureusement, il a été démontré que la corrélation trouvée est applicable seulement pour les sables naturels avec peu de fines (Mayne, 2013). En effet, deux échantillons de résidus miniers avaient été testés et leurs résultats étaient à l'extérieur des courbes des sables naturels tel qu'illustré sur la Figure 2-12.

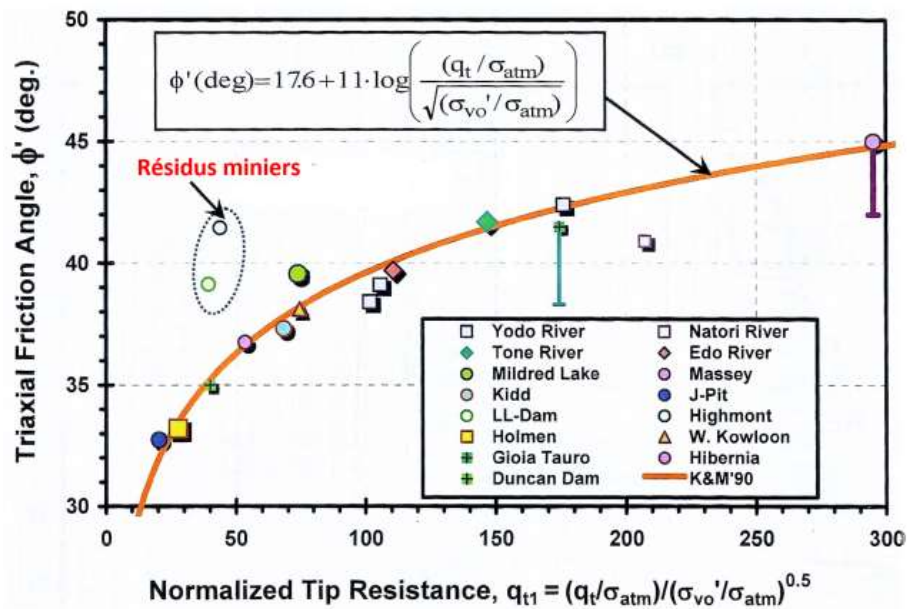


Figure 2-12 : Corrélation pour déterminer ϕ' à partir du CPTu dans les sables naturels (Mayne, 2013)

Une autre corrélation a été définie par Senneset et al. (1988, 1989) pour les silts et les argiles. Elle est décrite par l'équation [2-15] et illustrée sur la Figure 2-13. Lorsque a' ($a' = c' \cdot \cot \phi'$) est égal à zéro, l'équation [2-15] se simplifie en l'équation [2-16], ce qui correspond à la résistance en pointe normalisée Q_m de Robertson (2016). L'application de cette corrélation pour les résidus miniers n'a pas été vérifiée. En effet, tous les échantillons utilisés pour cette relation étaient des sols naturels (Mayne, 2013).

$$N_m = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo} + a'} \quad [2-15]$$

$$N_m = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} = Q_{tn} \quad [2-16]$$

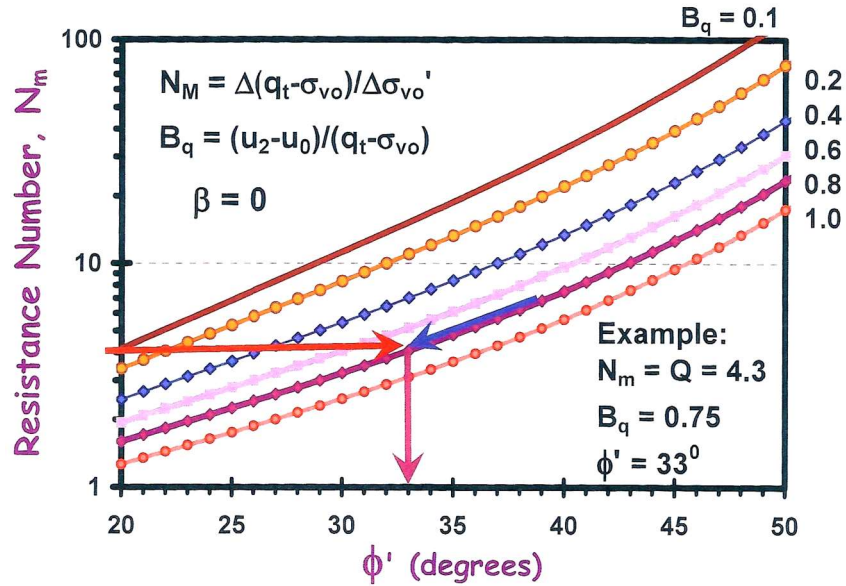


Figure 2-13 : Évaluation de ϕ' à partir du CPTu dans les silts et les argiles (Mayne, 2013)

Chen et Juang (1996) présentent une corrélation pour les sables normalement consolidés et très compressibles qui a été inspirée de la relation de Robertson et Campanella (1983) basée sur les sables drainés, normalement consolidés et moyennement compressibles. L'équation [2-17] montre la corrélation de Robertson et Campanella (1983) reliant l'angle de frottement interne effectif, la résistance en pointe du cône q_c et la contrainte effective σ'_v . Elle inclue aussi deux coefficients de régression, C_1 et C_2 , qui sont dépendants de la compressibilité du sol. Pour les sables très compressibles, il a été déterminé que le coefficient C_1 est égal à 6.079 et le coefficient C_2 est égal à 0.340 (Chen & Juang, 1996). La relation de Chen et Juang (1996) et ses applications sont discutés davantage dans la section 5.4. Il est important de noter que la résistance en pointe q_c n'est pas corrigée dans cette équation ($q_c \neq q_t$), car celle-ci a été développée sans les mesures de u et sur des sables drainés.

$$\tan \phi' = \frac{1}{C_1} \ln \left(\frac{q_c / \sigma'_v}{C_2} \right) \quad [2-17]$$

2.3.2.7 Module de cisaillement

Le module de cisaillement G est une propriété mécanique qui caractérise les déformations d'un matériau causé par des contraintes en cisaillement. Le module de cisaillement maximal G_{max} s'exprime en termes de masse volumique ρ et de vitesse de cisaillement V_s tel qu'indiqué dans l'équation [2-18].

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad [2-18]$$

Robertson et Campanella (1986) ont établi une corrélation entre le module de cisaillement maximal et la résistance en pointe pour les sables de quartz non cimentés. Cette corrélation est illustrée sur la Figure 2-14. Pour des valeurs de q_c plus petites que 5 MPa (50 bars), il est possible d'estimer une relation linéaire entre G_{max} et q_c qui est présentée dans l'équation [2-19] (James, 2009) :

$$G_{max} = 12.5 q_c \quad [2-19]$$

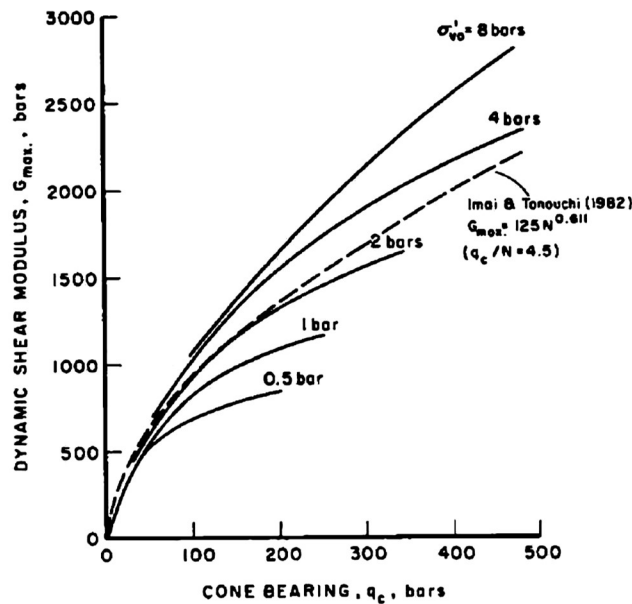


Figure 2-14 : Corrélation entre G_{max} et q_c (Robertson & Campanella, 1986)

Une autre corrélation a été établie par Mayne (2007) entre G_{max} , q_t et σ_{vo} pour différents types de sol. Celle-ci est exprimée par l'équation [2-20] qui a été obtenue à partir de résultats d'essais expérimentaux illustrés sur la Figure 2-15.

$$G_{max} = 50 \sigma_{atm} \left[\frac{(q_t - \sigma_{vo})}{\sigma_{atm}} \right]^m \quad [2-20]$$

où $m = 0.6$ pour les sables de quartz ou de silice, 0.8 pour les silts et 1.0 pour les argiles intactes.

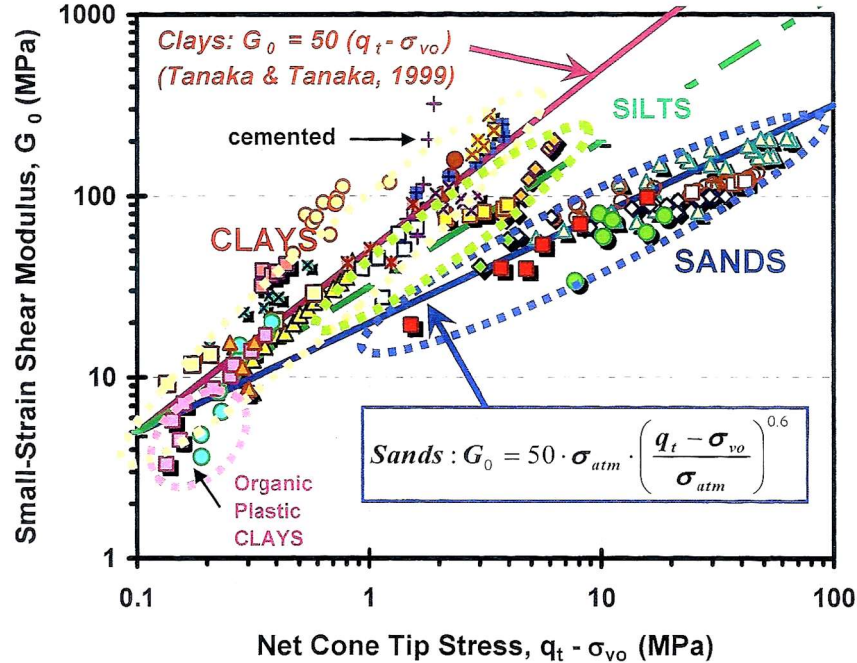


Figure 2-15 : Corrélation entre G_{max} et la résistance en pointe pour les sables, silts et argiles (Mayne, 2013)

2.3.2.8 Indice N de l'essai SPT pour l'analyse de liquéfaction

Ulrich & Hughes (1994) ont étudié les corrélations entre le test de pénétration standard SPT et le CPT pour améliorer les analyses de liquéfaction. Il a été démontré que pour les résidus miniers, l'indice N de l'essai SPT dépend de la résistance en pointe du cône et de la minéralogie des résidus (Ulrich & Hughes, 1994). De plus, il a été déterminé que le ratio q_c/N pour des résidus miniers est indépendant de la dimension moyenne des particules (D_{50}) contrairement à ce qu'avait indiqué Seed et De Alba (1986) et Robertson et al. (1983) dans leur relation développée sur les sols naturels (voir Figure 2-16) (Ulrich & Hughes, 1994). En effet, il a été confirmé qu'avec la relation q_c/N illustrée dans la Figure 2-16, la valeur prédite de N est surestimée par rapport à sa valeur réelle obtenue durant l'essai SPT dans des résidus qui sont généralement sous-consolidés et très stratifiés. Il a été déterminé qu'un ratio q_c/N pour des résidus miniers de la taille d'un silt fin est semblable à celui d'un sol grossier (entre 5 et 6) (Ulrich & Hughes, 1994). Ce ratio est

considéré comme étant spécifique au site en question, il doit être donc déterminé en effectuant des essais CPT et SPT. James (2009) a déterminé qu'un ratio de 5.70 est adéquat pour obtenir des valeurs de N à partir de q_c pour les résidus de la mine Laronde, au Québec, ce qui est en accord avec l'intervalle de Ulrich et Hugues (1994).

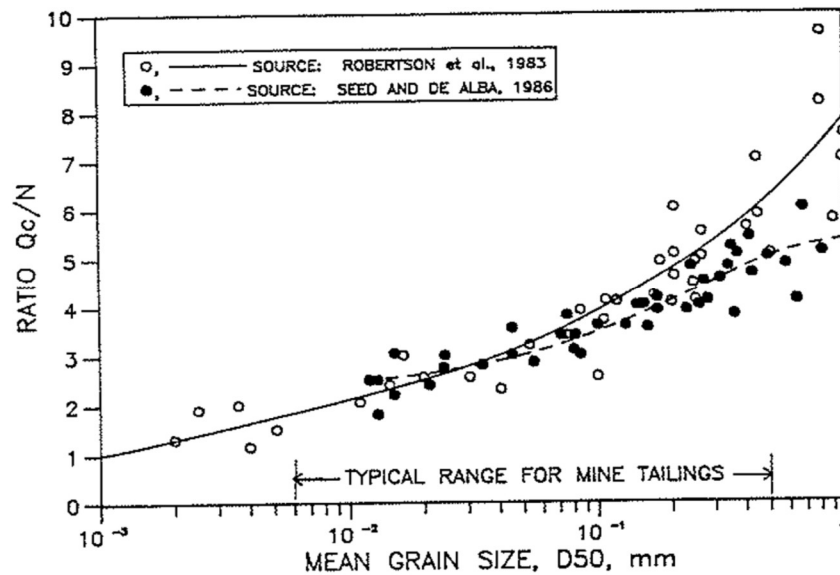


Figure 2-16 : Variation de q_c/N en fonction du D_{50} (Ulrich & Hughes, 1994)

Davies (1999) a établi une corrélation directement entre le ratio q_c/N et l'indice des matériaux I_c . Celle-ci assume qu'il y a une constance dans le type de comportement du sol sur toute la profondeur testée. Cette relation, exprimée par l'équation [2-21] ci-dessous, a été développée pour les résidus miniers étudiés dans la thèse de Davies (1999) :

$$\frac{q_c}{N} = 0.85 \left(1 - \frac{I_c}{4.75} \right) \quad [2-21]$$

où q_c est exprimé en MPa et N est le nombre de coups pour un enfoncement de 300 mm du carottier fendu.

2.3.2.9 Vitesse des ondes de cisaillement

Karray et Hussien (2017) offrent une corrélation entre V_{sl} , Q_m et D_{50} valide pour les sols fins non plastiques. Celle-ci est illustrée sur la Figure 2-17 et exprimée par l'équation [2-22]. Cette relation est utile lorsque des lectures de V_s ne sont pas possibles sur le terrain et que le D_{50} est plus petit que 0.2 mm. Il est important de noter que Q_m est calculé avec l'équation [2-23] et non l'équation de Robertson (2016). La relation entre V_{sl} et V_s est exprimée par l'équation [2-24].

$$\frac{V_{s1}}{Q_{tn}^{0.25}} = 43.7/D_{50}^{0.215} \quad [2-22]$$

$$Q_{tn} = \left(\frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma_{atm}} \right) \left(\frac{\sigma_{atm}}{\sigma'_{vo}} \right)^{0.5} \quad [2-23]$$

$$V_{s1} = V_s \left(\frac{\sigma_{atm}}{\sigma'_{vo}} \right)^{0.25} \quad [2-24]$$

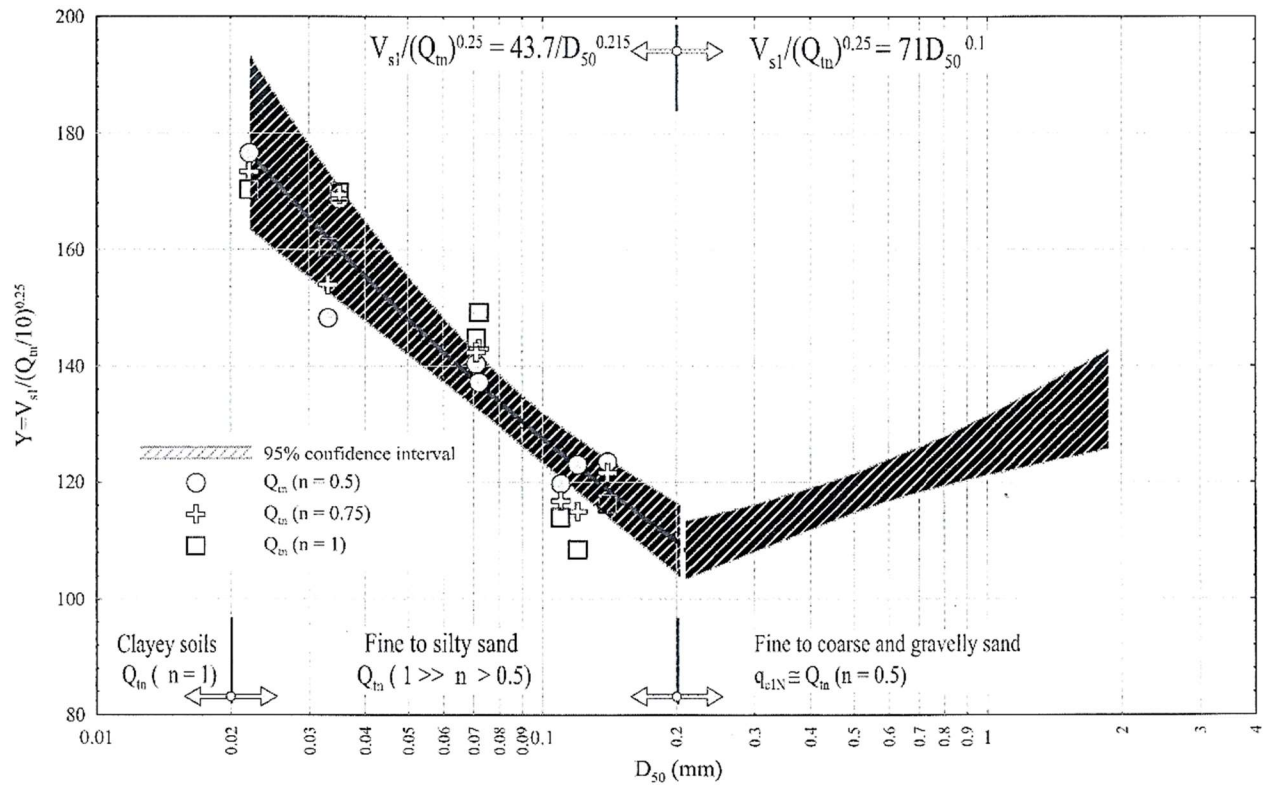


Figure 2-17 : Corrélation entre V_{s1} , Q_{tn} et D_{50} pour les sols fins (Karray & Hussien, 2017)

De plus, Karray et Hussien (2017) ont établi une corrélation entre V_{s1} , q_{t1N} (défini par l'équation [2-25] et [2-26] ci-dessous) et l'indice de comportement des sols I_c défini par Robertson (1990) et Davies (1999). Cette corrélation est montrée sur la Figure 2-18 et exprimée par l'équation [2-25] :

$$\frac{V_{s1}}{q_{t1N}^{0.411}} = 11.94 I_c^{1.45} \quad [2-25]$$

avec :

$$q_{t1N} = C_Q(q_c/\sigma_{atm}) \quad [2-26]$$

où C_Q est le facteur de normalisation ($C_Q \leq 1.7$) et est calculé avec l'équation [2-27] :

$$C_Q = (\sigma_{atm}/\sigma'_{vo})^n \quad [2-27]$$

où n est égal à 0.5 pour les sables, 1.0 pour les argiles et des valeurs intermédiaires pour les silts, silts sableux, et sables silteux.

Cette corrélation est considérée valide pour les sols dont le D_{50} est plus petit que 0.2 mm. Les auteurs indiquent qu'il est important de considérer l'impact du D_{50} dans les corrélations existantes entre q_t et V_s . Effectivement, plusieurs relations ignorent ce paramètre critique et parfois le I_c seulement est utilisé comme indicateur de grosseur de particules faussant ainsi les résultats recherchés (Karray & Hussien, 2017).

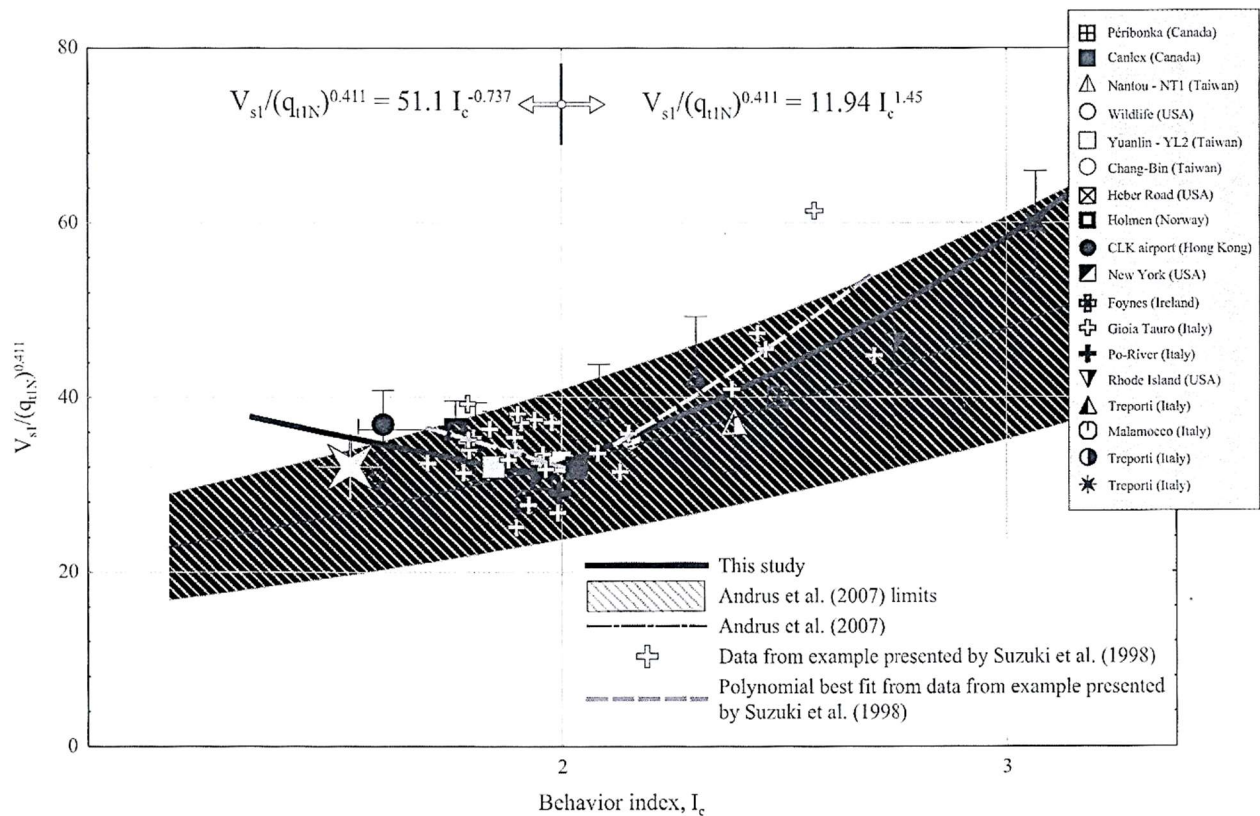


Figure 2-18 : Corrélation entre V_{s1} , q_{t1N} et I_c (Karray & Hussien, 2017)

2.3.2.10 Pressions interstitielles

Il n'y a pas de corrélation directe entre la pression interstitielle mesurée lors d'un essai CPTu et la pression hydrostatique, sauf si le cône est arrêté et qu'un test de dissipation est effectué (Robertson & Campanella, 1986). L'essai de dissipation permet à la pression interstitielle de se stabiliser et d'atteindre un plateau qui indique la pression interstitielle réelle à cette profondeur. Lorsque le capteur de pression est installé à la base du cône (Type 2), il est observé que, pour les silts saturés moyennement denses et denses, les lectures de pressions interstitielles sont plus petites que la pression hydrostatique à cette profondeur à cause de leur comportement dilatant. Dans le cas de silts lâches, il est observé que la pression interstitielle mesurée peut être jusqu'à 1.5 fois plus grande que celle hydrostatique (Robertson & Campanella, 1986).

James (2009) a démontré qu'un essai CPTu dans des résidus miniers génère un excès de pression dans les zones de faible résistance en pointe. Dans les zones de plus grande résistance, la lecture de pression interstitielle u_2 est généralement plus petite que la pression hydrostatique, ce qui concorde à ce qu'avait déterminé Robertson et Campanella (1986) pour les silts denses (James, 2009).

Tel que mentionné précédemment, la pression interstitielle mesurée à l'aide du piézocône a un impact sur les lectures de résistance en pointe. C'est pourquoi il est important de minimiser l'excès de pressions lors de la pénétration du cône.

2.3.3 Application aux résidus miniers

Généralement, il est accepté que le CPT peut être utilisé dans les parcs à résidus pour obtenir des informations sur les conditions *in situ*. Durant l'essai, les lectures des paramètres q_c , f_s , u_m et V_s peuvent être obtenues. Par contre, les corrélations pour les sols naturels doivent être utilisées avec précaution lorsqu'il est question de résidus miniers (James, 2009). En effet, beaucoup d'études ont été réalisées sur des argiles, des sables et des sables silteux (moins de 20% de silt), mais très peu ont été faites sur les silts ou les résidus miniers (Shuttle & Cuning, 2007).

Lorsqu'il est question de silts et de résidus miniers, il est admis que leur comportement se trouve entre celui d'un sable et celui d'un silt. Il est très difficile d'obtenir des échantillons intacts de silts et de résidus miniers ou de savoir la valeur exacte des contraintes effectives *in situ*, ce qui rend leur étude difficile (Shuttle & Cuning, 2007). Il a également été démontré que le

comportement des silts varie énormément si ceux-ci sont lâches ou denses. De plus, les essais en laboratoire sur les résidus miniers ne donnent pas des propriétés et des caractéristiques qui sont nécessairement représentatives des conditions dans le parc à résidus, car les échantillons étudiés en laboratoire sont souvent recueillis directement à la sortie du concentrateur et sont testés dans des conditions homogènes et isotropes tel que mentionné précédemment.

L'applicabilité et la répétitivité de l'essai CPT ainsi que la qualité et la continuité des données obtenues font en sorte que le piézocône peut être utile pour déterminer les propriétés des résidus miniers et leurs conditions *in situ*. Le CPT a été utilisé par le passé en complément à l'essai dilatométrique pour recueillir davantage d'informations sur la stratification de résidus miniers (Mlynarek et al., 1998). Malheureusement, aucune méthodologie spécifique pour évaluer leurs propriétés à partir des données de pénétration au cône n'a été mise en place (Shuttle & Cuning, 2007). De plus, plusieurs facteurs spécifiques aux résidus miniers risquent d'affecter les données obtenues avec le CPT ainsi que leurs interprétations. Ces facteurs sont :

- Les résidus n'ont pas les mêmes propriétés qu'un seul type de sols naturels. Les propriétés mécaniques des résidus sont semblables aux sables, alors que leur granulométrie est similaire aux silts et sables fins et leurs propriétés hydrauliques sont semblables aux silts. Il n'est donc pas clair quelles corrélations (basées sur quels types de sols) peuvent être employées;
- Des lentilles de glaces ou de résidus gelés peuvent se retrouver dans les parcs à résidus causant des lectures de q_c élevées (Golder, 2014, Lunne et al., 1997);
- Le phénomène de la dessiccation qui forme des lentilles de résidus très raides et plus résistantes à la pénétration du cône (James, 2009);
- L'état sous-consolidé des résidus qui n'est pas remarqué dans les sols naturels;
- La difficulté d'évaluer les pressions interstitielles *in situ* et donc les contraintes effectives. L'hypothèse que la pression est hydrostatique est souvent utilisée à défaut de connaître les vraies valeurs. Cette hypothèse peut affecter grandement l'interprétation des résultats si les corrélations existantes sont employées.

L'applicabilité et la validité des corrélations présentées dans la section 2.3.2 sont étudiées dans ce mémoire pour les résidus miniers de Canadian Malartic ainsi que le développement d'une méthodologie d'analyse et d'interprétation des essais CPT.

CHAPITRE 3 DESCRIPTION DU SITE ET DES CARACTÉRISTIQUES DES RÉSIDUS MINIERS DE CANADIAN MALARTIC

3.1 Description de la mine

La mine Canadian Malartic est située dans la ville de Malartic dans l'ouest du Québec, tel qu'illustré sur la Figure 3-1. Elle est l'une des plus grandes mines d'or à ciel ouvert au Canada (Canadian Malartic, 2014). L'aménagement de la mine est illustré sur la Figure 3-2. Commenant sa production commerciale en 2011, la mine a une production moyenne d'environ 580 000 onces d'or par année. Sa production journalière actuelle a atteint environ 55 000 tonnes de minerai, 125 000 tonnes de stériles et 55 000 tonnes de résidus miniers (James et al., 2017). Cette mine fait donc face aux mêmes défis que le reste de l'industrie minière en ce qui a trait à la gestion de ses rejets et à son impact environnemental.

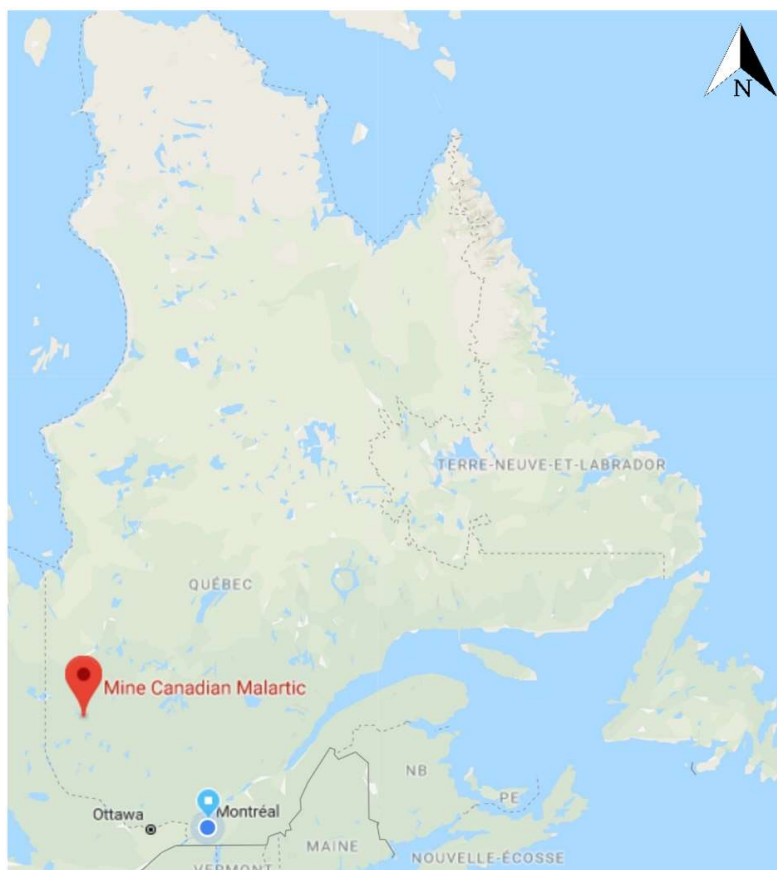


Figure 3-1 : Localisation de la mine Canadian Malartic (Google maps, 2017)



Figure 3-2 : La mine Canadian Malartic en Abitibi-Témiscamingue (Québec)

(Aubertin et al., 2016)

3.2 Le parc à résidus de la mine Canadian Malartic

Le parc à résidus de la mine Canadian Malartic a une aire d'environ 470 hectares et atteindra une hauteur maximale de 40 m. Les résidus sont retenus par des digues construites en amont, dont la pente est de 10H :1V avec des stériles et des matériaux de faible perméabilité tel qu'illustré sur la

Figure 3-3. Tel que mentionné précédemment, cette méthode de construction est particulièrement à risque de rupture si les résidus liquéfient, il est donc important de connaître les propriétés de ces résidus et d'effectuer des analyses de stabilité statique et dynamique pour garantir la longévité des ouvrages.

Comme il peut être remarqué sur la

Figure 3-3 illustrant la coupe transversale de la Digue 5, les résidus miniers de Canadian Malartic sont placés au-dessus d'anciens résidus provenant d'une mine exploitée antérieurement et ceux-ci sont au-dessus d'une couche d'argile, de till et de roc. Il est important de noter que le type de sol ainsi que l'élévation de la fondation varie à travers le parc à résidus.

La minière a décidé d'ajouter la conception et la construction d'inclusions dans le parc à résidus dans le but de profiter des nombreux avantages apportés par ces ouvrages sur la gestion des rejets ainsi que sur le comportement du parc à résidus (Bolduc & Aubertin, 2014). En effet, il a été remarqué que, entre autres, les inclusions facilitent et accélèrent la dissipation des pressions interstitielles. Ces pressions en excès se développent à cause de la déposition incrémentale de résidus, les cycles de gel et dégel qui restreint le drainage, les lentilles de glace retrouvées dans les résidus qui bloquent le passage de l'eau ainsi que la conductivité hydraulique plus faible en raison de la basse température de l'eau (Freeze & Cherry, 1979; Bolduc, 2012; Golder, 2014; James et al, 2017). L'influence des inclusions sur les résidus miniers est observée et discutée dans le Chapitre 6.

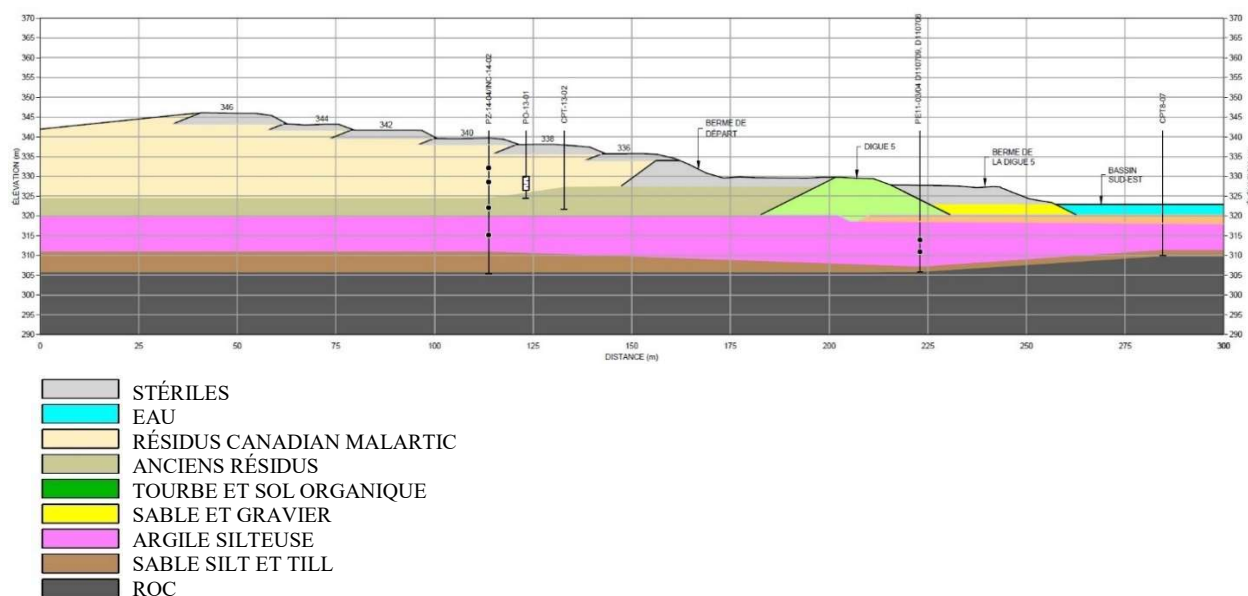


Figure 3-3 : Coupe transversale de la Digue 5 illustrant la construction en amont de la digue (échelle 1 :1000) (Golder, 2016)

3.3 Caractéristiques des résidus de la mine Canadian Malartic

Les caractéristiques et les propriétés des résidus miniers de Canadian Malartic sont présentées dans les sections 3.3.1 à 3.3.7. Dans le but de confirmer que les propriétés et les caractéristiques des résidus miniers de la mine Canadian Malartic correspondent à celles des résidus provenant de mine en roche dure (présentées au Chapitre 2), une comparaison des valeurs est également incluse dans les sections ci-dessous. Il est important de noter que les résidus utilisés dans les essais de caractérisation, dont les résultats sont présentés dans les sections suivantes, ont été obtenus directement à la sortie du concentrateur pour éviter la ségrégation des particules.

3.3.1 Densité relative des grains

Il a été démontré que la densité relative des grains des résidus de Canadian Malartic est de l'ordre de 2.75 (Bolduc, 2012; Poncelet, 2012; Essayad, 2014; Bolduc & Aubertin, 2014). Cette valeur est comprise dans la gamme de valeurs déterminées par Aubertin (2011) et Bussière (2007) pour les mines en roche dure. Grimard et James (2017) et Archambault-Alwin et al. (2017a) ont déterminé une valeur de D_r de 2.69 et 2.71 respectivement.

3.3.2 Granulométrie, plasticité et classification

La granulométrie des résidus miniers de la mine Canadian Malartic, dont les résultats sont illustrés sur la Figure 3-4, correspond à l'intervalle de granulométries de résidus provenant de mines en roche dure décrite par Bussière (2007). Cependant, une évolution de la granulométrie de ces résidus a été observée au fil des ans. Effectivement, James et al. (2017) remarquent que la granulométrie des résidus miniers de Canadian Malartic avant 2013 consistait en des fines avec moins de 5% de sable fin alors qu'après 2013, ce pourcentage a augmenté pour atteindre 21% en 2017 (Grimard & James, 2017; James et al., 2017; Archambault-Alwin et al., 2017b). La granulométrie des résidus miniers plus grossiers, obtenue en 2017, est détaillée plus loin dans la section 4.1.1.2. Les coefficients d'uniformité déterminés dans les recherches précédentes sur les résidus de Canadian Malartic sont compris entre 6.00 et 14.62 (voir Tableau 3-1), ce qui est similaire aux valeurs trouvées par Bussière (2007) et Aubertin (2011). Les déterminations des limites d'Atterberg ont, pour beaucoup d'auteurs, indiquées que ces résidus sont faiblement plastiques à non plastiques (James et al., 2017). Les résidus de la mine Canadian Malartic sont donc classés comme étant des silts non plastiques (ML) selon le système USCS.

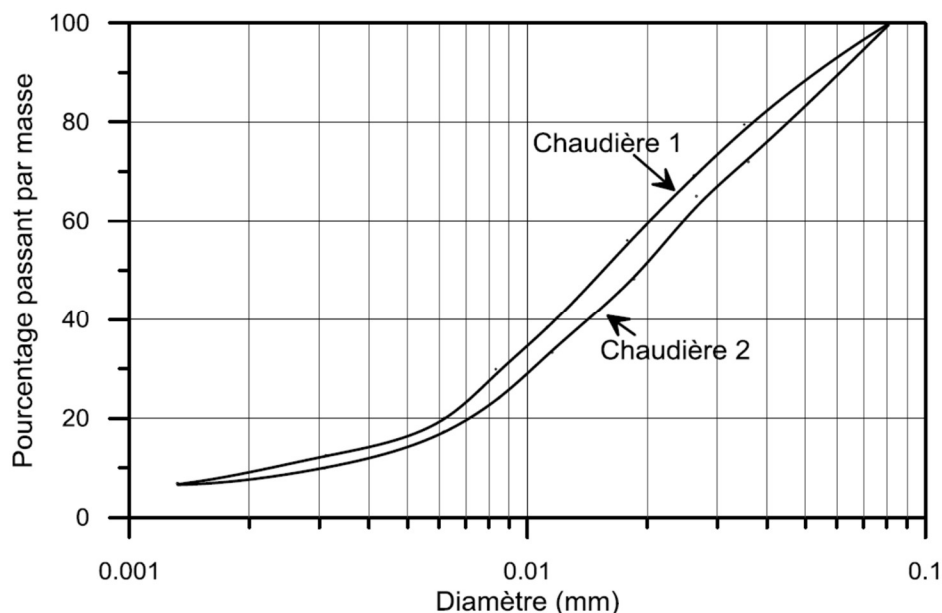


Figure 3-4 : Granulométrie des résidus miniers de Canadian Malartic (Contreras, 2013)

3.3.3 Indice des vides maximal et minimal

À défaut de pouvoir réaliser avec succès des essais à la table vibrante pour déterminer l'indice des vides minimal, car les particules fines s'échappent du moule, plusieurs essais Proctor modifié ont été réalisés au fil des années sur les résidus de Canadian Malartic. Il a été déterminé par Contreras (2013) que l'indice des vides minimal est d'environ 0.54 et l'indice des vides maximal est d'environ de 1.60. Ce dernier a été obtenu en faisant des essais de masse volumique en condition non tassée. Grimard et James (2017) ont obtenu des valeurs similaires; 0.45 pour e_{min} et 1.53 pour e_{max} . Archambault-Alwin et al. (2017a) ont obtenu un e_{min} de 0.45 et e_{max} de 1.49.

3.3.4 Conductivité hydraulique saturée

Les conductivités hydrauliques saturées des résidus miniers sont comprises entre 1.0×10^{-5} cm/s tel que trouvé par Contreras (2013) et 1.0×10^{-8} cm/s, selon Golder (2014). Cet intervalle de valeurs correspond à celui trouvé par Bolduc et Aubertin (2014), ainsi que Bussière (2007) pour les résidus fins de type ML.

3.3.5 Paramètres de consolidation

L'indice de compressibilité C_C pour les résidus miniers de Canadian Malartic varie de 0.0028 à 0.42 (Bolduc, 2012; Contreras, 2013; Grimard & James, 2017). Cet intervalle correspond à celui trouvé par Bolduc et Aubertin (2014), qui est compris entre 0.078 et 0.224 pour les résidus provenant de la même mine. Cependant, il est plus large que l'indice de compressibilité trouvé par Aubertin (2011) et Bussière (2007) qui varie de 0.05 et 0.30. Par ailleurs, il a été déterminé que le coefficient de consolidation vertical c_v des résidus miniers de Canadian Malartic varie de 0.1 and 3.0 tel qu'indiqué par Bolduc (2012), ce qui est similaire à ce qu'avaient déterminé Aubertin (2011) et Bussière (2007) pour les résidus fins ML de mine en roches dure, qui ont des valeurs plus grandes que 0.1 cm²/s.

3.3.6 Paramètres de résistance au cisaillement

La cohésion effective des résidus provenant de la mine Canadian Malartic est déterminée comme étant nulle ce qui est identique à ce que Bussière (2007) avait trouvé pour des résidus de mines de roche dure (Poncelet, 2012; Grimard & James, 2017; Archambault-Alwin et al., 2017a). L'angle de frottement interne effectif des résidus de la mine Canadian Malartic varie entre 35 et 38.7° dépendamment du type d'essais réalisés (cisaillement direct ou triaxiaux) (Grimard & James, 2017; Archambault-Alwin et al., 2017a). Il est important de noter que les essais triaxiaux, tel que réalisés par Poncelet (2012), Contreras (2013), Golder (2014) et Grimard et James (2017), peuvent donner des valeurs d'angle de frottement interne effectif plus élevées que celles obtenues à l'aide d'essais de cisaillement direct, tel que la valeur obtenue par Archambault-Alwin (2017a) (voir Tableau 2-2). Cette différence est due au fait qu'un plan de cisaillement est imposé par l'appareil de cisaillement direct alors que la cellule triaxiale impose des contraintes sur le sol et le plan de rupture est influencé uniquement par les paramètres de résistance au cisaillement des résidus. Les valeurs d'angle de frottement interne effectif des résidus de la mine Canadian Malartic présentées dans le Tableau 2-2 sont dans l'intervalle déterminé par Aubertin (2011) pour les résidus provenant de mine en roche dure (voir section 2.2.1.6).

3.3.7 Synthèse des résultats

Tel que mentionné précédemment, plusieurs recherches ont été réalisées pour notamment caractériser les propriétés des résidus miniers de la mine Canadian Malartic. Un résumé des caractéristiques obtenues dans les travaux de Bolduc (2012), Poncelet (2012), Contreras (2013), Golder (2014), Essayad (2015), Grimard et James (2017) et Archambault-Alwin (2017) est présenté dans le Tableau 3-1. Ce tableau donne également une indication de l'évolution des propriétés physiques, de consolidation et de conductivité hydraulique.

Tableau 3-1 : Caractérisation des résidus miniers de Canadian Malartic

Paramètres	Bolduc (2012)	Poncelet (2012)	Contreras (2013)	Golder (2014)	Essayad (2015)	Grimard et James (2017)	A.- Alwin (2017)
D₁₀ (mm)	0.0013 à 0.003	0.0029	0.002 à 0.003	0.0013 à 0.005	0.0046	0.004	0.003
D₆₀ (mm)	0.018 à 0.019	0.021	0.02 à 0.03	0.024 à 0.052	0.037	0.044	0.038
C_U	6.00 à 14.62	7.24	8.33 à 9.09	N/D	7.17	11.9	12.7
w_{opt} (%)	16.3	N/D	15 à 16.1	N/D	N/D	N/D	N/D
D_r	2.75	2.75	2.73	2.74	2.755	2.69	2.71
γ_d (kN/m³)	17.02	N/D	10.29 à 17.36	19.5	N/D	N/D	N/D
w_L (%)	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
w_P (%)	N/D	0	N/D	0	N/D	0	0
Classification USCS	ML	ML	ML	N/D	ML	ML	ML
C_c	0.0028 à 0.314	N/D	0.051 à 0.42	N/D	N/D	0.08 à 0.11	N/D
c_v (cm²/s)	0.1 à 3.0	N/D	0.63 à 0.76	N/D	N/D	N/D	N/D
c' (kPa)	N/D	0	0	0	N/D	N/D	0
φ' (°)	N/D	35.3 à 36.1	36.8	37.9	N/D	38.7	35
k_{sat} (cm/s)	1.12 x 10 ⁻⁵ à 3.88 x 10 ⁻⁵	N/D	9.31 x 10 ⁻⁶ à 1.01 x 10 ⁻⁵	1.0 x 10 ⁻⁸ à 2.0 x 10 ⁻⁷	3.1 x 10 ⁻⁵ à 3.2 x 10 ⁻⁵	N/D	N/D

N/D – Non déterminé

CHAPITRE 4 ESSAIS EN LABORATOIRE ET SUR LE TERRAIN

4.1 Essais en laboratoire

Les résidus miniers de la mine Canadian Malartic ont été reçus à Polytechnique Montréal dans quatre barils de 250 l remplis directement du concentrateur. Ces résidus ont été retirés, mélangés, homogénéisés et ensuite séparés dans plus d'une trentaine de chaudières. Plusieurs échantillons ont été étudiés (granulométrie et teneur en eau) pour confirmer que les mélanges obtenus dans chaque chaudière sont représentatifs de l'ensemble du matériau reçu de la mine. La teneur en eau des résidus miniers sortant du concentrateur a été déterminée en suivant la norme ASTM D2216-10 et était en moyenne de 31.5% avec une variation de plus ou moins 0.5%. Les résidus ont ensuite été lavés, séchés et tamisés pour pouvoir réaliser d'autres essais. Les chaudières contenant le matériau sec ont été divisées pour d'autres projets nécessitant des essais en laboratoire sur les résidus miniers de la mine Canadian Malartic.

4.1.1 Essais conventionnels

La description des essais réalisés dans le cadre de cette recherche ainsi que les résultats obtenus sont présentés dans les sections ci-après. Ces essais ont été choisis spécifiquement pour que leurs résultats puissent être comparés aux résultats d'essais de pénétration au cône en laboratoire.

4.1.1.1 Densité relative des grains

La densité relative des grains, D_r , des résidus a été obtenue grâce à l'essai au pycnomètre (ASTM D854, 2014). Trois essais ont été faits et sont présentés dans l'Annexe 1. En moyenne, le D_r obtenu est de 2.71 (± 0.02).

4.1.1.2 Granulométrie, plasticité et classement

La granulométrie de trois échantillons provenant de deux chaudières a été obtenue en suivant la norme ASTM D422 (2007). Les courbes de granulométrie des résidus utilisés dans les essais CPT de laboratoire, détaillés dans la section 4.1.2.1, sont présentées sur la Figure 4-1. Les échantillons se sont avérés être très similaires et leur granulométrie est très étalée. Il peut être remarqué que le D_{10} varie entre 0.0028 et 0.0035 mm, le D_{60} varie entre 0.037 et 0.039 mm et

qu'il y a une teneur en sable fin d'environ 22% ce qui correspond à ce qu'avait indiqué James et al. (2017). Le coefficient d'uniformité C_u se trouve entre 11.4 et 13.2 pour ces courbes.

Les essais pour déterminer les limites d'Atterberg décrits dans la norme ASTM D4318 (2010) ont confirmés que les résidus miniers sont non plastiques. Selon le système de classification USCS, les résidus sont donc classés comme étant des silts non plastiques (ML). Ceci concorde avec les résultats obtenus par différents auteurs qui ont travaillé avec les résidus de la mine Canadian Malartic tel que Poncelet (2012), Bolduc (2012), Contreras (2013) et Essayad (2014).

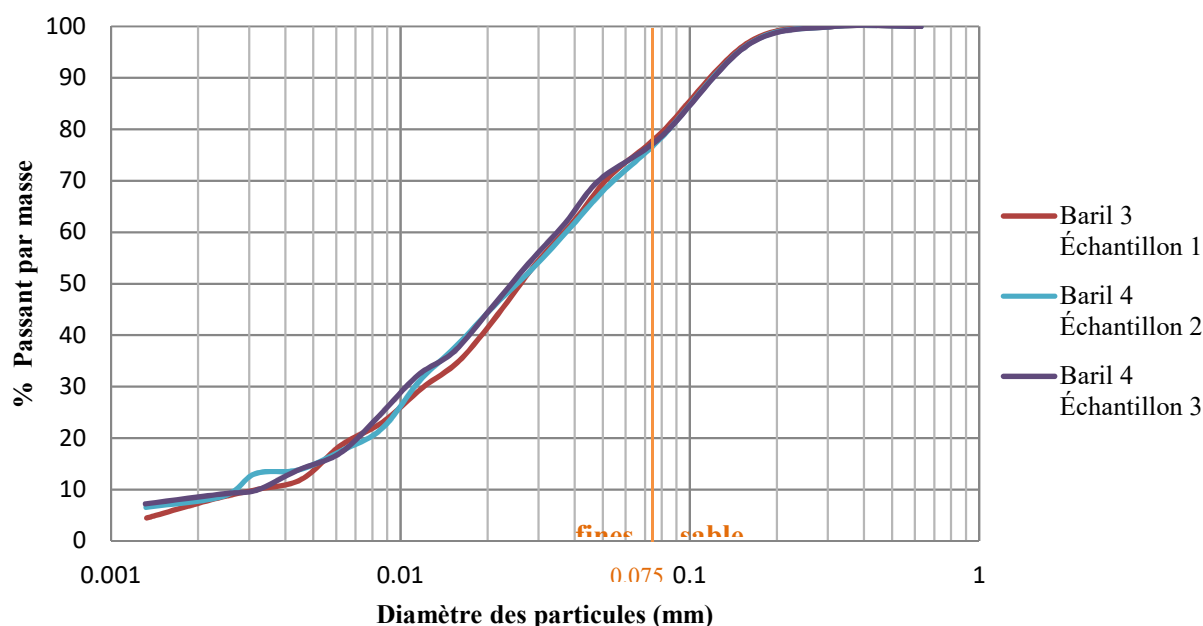


Figure 4-1 : Granulométrie des résidus miniers de Canadian Malartic

4.1.1.3 Indice des vides maximal et minimal

Les indices des vides maximal et minimal ont été déterminés en laboratoire en réalisant différents essais. Avec le Proctor modifié, en suivant la procédure décrite dans l'ASTM D1557 (2012), l'indice des vides à l'optimum était de 0.46. Les résultats de l'essai sont détaillés en Annexe 1. Des essais avec la table vibrante, tel que décrit dans l'ASTM D4254 (2016), ont été tentés pour déterminer e_{min} , mais la nature très fine des résidus ne permet pas de réaliser cet essai avec succès car les particules s'échappent du moule. La valeur obtenue à l'aide du Proctor modifié est donc utilisée comme étant le e_{min} pour ces résidus. Il a été possible de calculer e_{max} , qui est 1.52 en remplissant un moule avec des résidus déposés dans un état lâche tel que décrit dans la norme

ASTM D4253 (2016). Ces résultats sont semblables aux valeurs obtenues par Grimard et James (2017) et Archambault-Alwin et al. (2017) présentés dans la section 3.3.3.

4.1.1.4 Paramètres de résistance en cisaillement

L'angle de frottement interne effectif a été obtenu en laboratoire à l'aide de l'essai de cisaillement direct en suivant la norme ASTM D3080 (2011). Celui-ci est de 34.7° ce qui est presque égal à celle obtenue par Archambault-Alwin (2017) qui est de 35° . Cependant, cette valeur est plus petite que celle trouvée par Grimard et al. (2017), qui était de 38.7° déterminée à l'aide de l'essai triaxial. Cette différence entre les valeurs est normale, car l'essai de cisaillement direct impose une surface de cisaillement, alors que la rupture obtenue dans l'essai triaxial dépend uniquement des propriétés du matériau. Il a également été confirmé que la cohésion effective est nulle pour ces résidus. Les données des essais de cisaillement direct réalisés dans le cadre de cette recherche sont présentées en Annexe 1.

4.1.2 Essai de pénétration au cône

Divers essais en laboratoire ont été effectués par le passé pour simuler la pénétration au cône réalisée sur le terrain. Les essais les plus populaires dans la littérature sont l'essai à la centrifugeuse à l'aide d'un cône miniature, l'essai dans une chambre calibrée et l'essai réalisé dans une cellule de taille intermédiaire avec un cône de taille standard ou miniature.

Dans le cadre de cette recherche, l'essai de pénétration au cône en laboratoire a été réalisé dans une cellule de taille intermédiaire (34 cm par 50 cm de hauteur) avec un cône standard. Considérant la taille de cellules dites intermédiaires, dont le diamètre varie généralement entre 0.50 et 2.10 m, la majorité des essais réalisés dans la littérature ont été faits pour des sables grossiers et non des silts ou des résidus miniers (Raju, 2010). La méthodologie développée par Ghali et al. (2015) sur les sables secs a été suivie car la même cellule, développée à l'Université de Sherbrooke, a été utilisée. L'équipement, la méthodologie ainsi que les résultats de laboratoire sont présentés dans les sections suivantes.

4.1.2.1 Essais CPT en laboratoire dans une cellule intermédiaire

4.1.2.2 Équipement

L'appareil de simulation CPT a été développé dans le laboratoire de géotechnique de l'Université de Sherbrooke où il a précédemment été utilisé sur des sables secs par Ghali et al. (2015). Un schéma de cet équipement est montré sur la Figure 4-2 et une photo de l'appareil à Sherbrooke est fournie en Figure 4-3.

Tel qu'illustré sur ces figures, l'appareil est semblable à un œdomètre et consiste en un compresseur hydraulique appliquant une force verticale sur le bras de levier qui amplifie et transfère cette force à la cellule instrumentée contenant les résidus. L'amplification du bras de levier est de 5.45 fois la pression appliquée et son propre poids ajoute une force de 1.875 kN sur la cellule (Ghali et al., 2015).

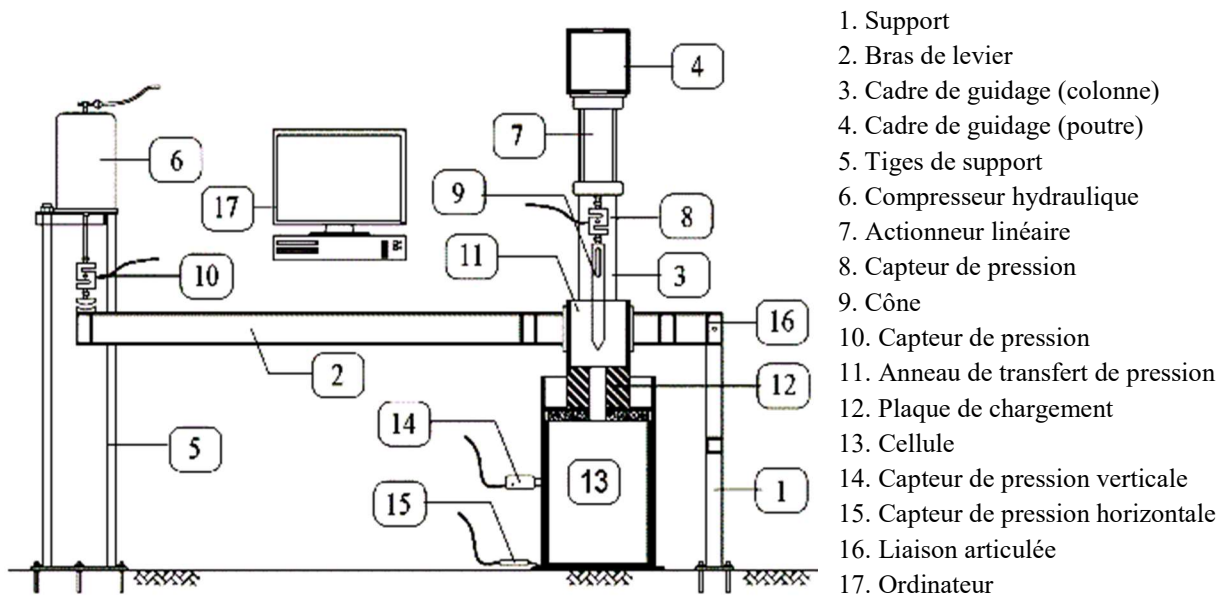


Figure 4-2 : Schéma de l'appareil de pénétration au cône dans une cellule de taille intermédiaire (Ghali et al. 2015)

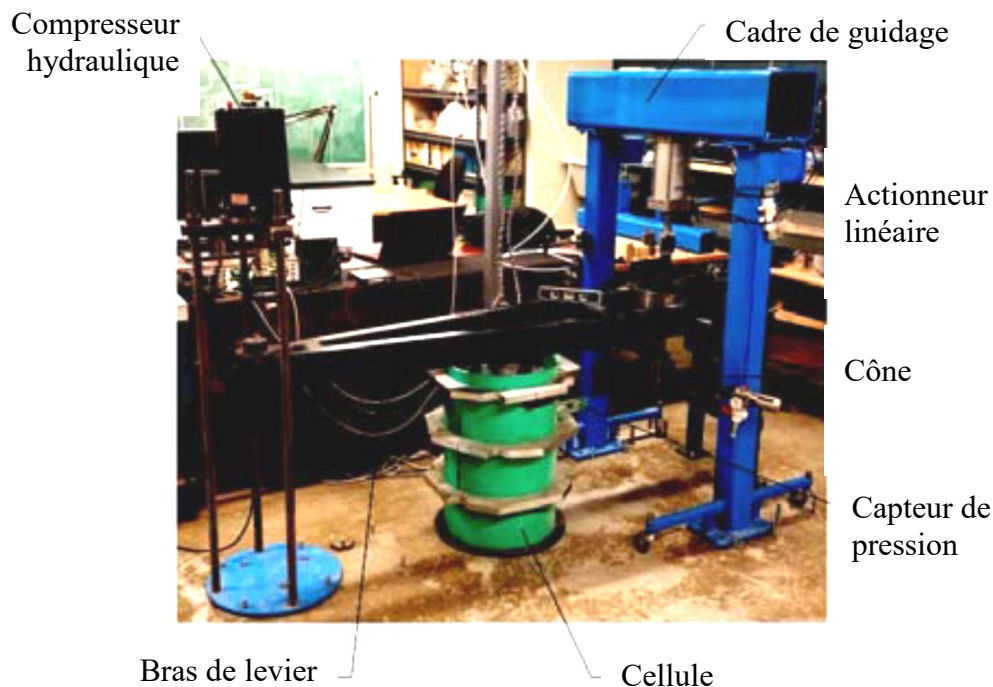


Figure 4-3 : Appareil de simulation CPT de l'Université de Sherbrooke (Ghali et al., 2015)

La cellule rigide a deux capteurs de force : un installé au bas de la cellule et un installé verticalement sur la paroi (voir Figure A2-1 de l'Annexe 2). Ces capteurs sont utiles pour observer instantanément et en continu la variation en pression verticale et horizontale durant la consolidation des résidus, ainsi que durant l'essai de pénétration au cône. La cellule contient également une membrane semi-flexible ayant un module d'Young E de 186 kPa et un coefficient de Poisson ν de 0.495. Celle-ci est illustrée sur la Figure 4-4. Elle permet de simuler des conditions semblables à celles du terrain au repos et de limiter l'effet de confinement causé par la cellule rigide extérieure. En effet, cette membrane diminue l'effet des parois rigides en permettant au sol de subir une légère expansion latérale en se déformant lorsque les pressions verticales sont appliquées. Ses dimensions sont de 340 mm de diamètre intérieur et 500 mm de hauteur. Une couche de géotextile est également installée dans la cellule sur les parois, en bas, ainsi qu'en haut de la cellule entre le sol et la membrane semi-flexible pour créer un chemin préférentiel pour l'écoulement de l'eau et faciliter le drainage. Ceci permet aux résidus de se consolider plus rapidement et ainsi procéder à l'essai CPT dans des conditions normalement consolidées. Le géotextile installé au-dessus du sol a un trou circulaire prédécoupé pour ne pas gêner l'installation du cône (voir Figure A2-5 dans l'Annexe 2).

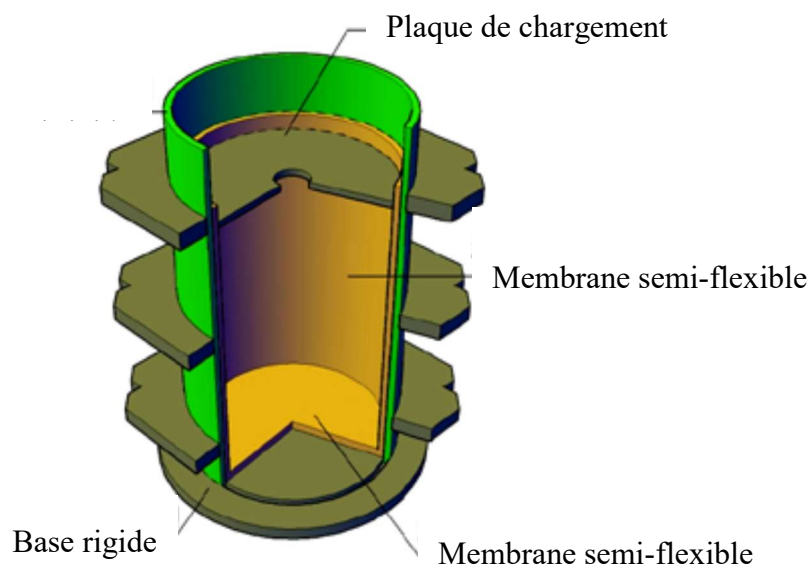


Figure 4-4 : Schéma de la cellule instrumentée de l'Université de Sherbrooke
(Ghali et al., 2015)

La plaque circulaire transférant les pressions du bras de levier au sol a été conçue en acier et possède un centre dévissable pour permettre au cône de pénétrer dans la cellule. Cette conception a été choisie pour garantir une distribution uniforme des pressions durant la période de consolidation tout en offrant la possibilité de faire l'essai de pénétration sans procéder à un déchargement. La plaque a été conçue pour couvrir uniformément toute la surface des résidus sans entrer en contact avec la membrane semi-flexible autour de l'échantillon. De plus, un indicateur à cadran est utilisé pour mesurer le déplacement vertical de cette plaque lors de la consolidation et ainsi déterminer quand le sol est consolidé.

Le cône utilisé dans ces essais est de dimension standard avec une aire de 10 cm^2 et un diamètre de 35.68 mm. Il est installé sur le support métallique juste au-dessus de la cellule contenant les résidus tel qu'illustré sur la Figure 4-5 lorsque l'essai est prêt à avoir lieu. Le cône, les capteurs de pression ainsi que le compresseur sont tous connectés à un ordinateur pour pouvoir enregistrer les variations de pressions détectées par chaque instrument.

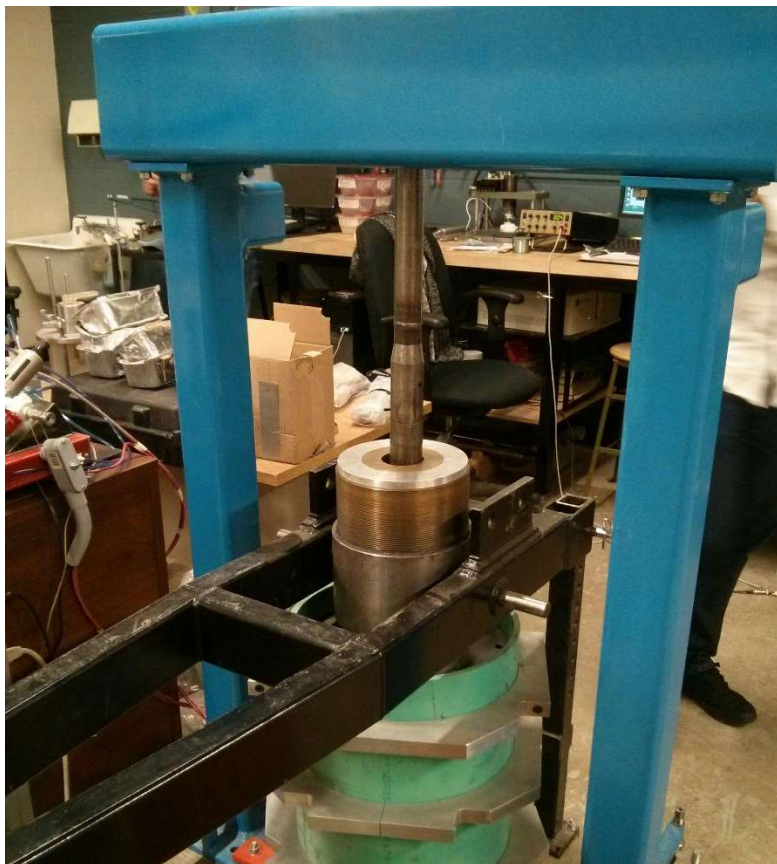


Figure 4-5 : Installation du cône dans la cellule pour réaliser l'essai CPT en laboratoire

L'utilisation de cette cellule de taille intermédiaire ainsi que ce cône standard est supposée appropriée pour ce type de matériau à tester. Plusieurs articles dans la littérature discutent de différents paramètres qui doivent être considérés lors de l'utilisation d'une cellule intermédiaire. Un des paramètres à considérer est le ratio entre le D_{50} du sol à tester et le diamètre du cône. Il a été démontré que si ce ratio est plus grand que 20, la taille des particules n'a pas d'impact sur les lectures de résistance en pointe (Bolton et al., 1999). Le ratio entre le diamètre du cône utilisé dans les essais, présentés dans la section 4.1.2.1, et le D_{50} des résidus miniers de Canadian Malartic est largement supérieur à 20 indiquant que le diamètre du cône est adéquat pour ces résidus. Le ratio entre le diamètre de la cellule et le diamètre du cône doit également être considéré. En effet, Omidvar et al. (2014) indiquent qu'une cellule rigide pourrait créer un effet de confinement qui rendrait la pénétration plus difficile. Ceci aurait comme impact d'obtenir des valeurs de q_c plus élevées pour ce sol. Pour les sables très denses ($I_D > 90\%$), il a été déterminé qu'un ratio de $D_{cellule}/D_{cône}$ plus petit que 50 avait une influence sur les résultats alors que pour les sables lâches ($I_D < 30\%$), ce ratio a une influence négligeable sur les lectures de q_c , même

lorsqu'il est aussi petit que 20. Le ratio minimum entre $D_{cellule}/D_{cône}$ pour les sables lâches n'a pas encore été déterminé (Schnaid & Houlsby, 1991; Omidvar et al., 2014). Dans le cadre de ce travail, la dimension de la cellule utilisée pourrait avoir une influence sur les lectures de q_c car le ratio entre le diamètre de la cellule et celui du cône est de 9.5 (< 50). Cependant, considérant que la membrane semi-flexible est présente pour diminuer l'effet de confinement et que le matériau est plus fin que du sable, il est supposé que l'effet des parois est négligeable. Cette hypothèse est discutée et validée dans la section 5.2.1.

4.1.2.3 Méthodologie

Trois chaudières de résidus secs ont été transportées à l'Université de Sherbrooke pour réaliser les essais CPT en laboratoire. Les résidus ont été pesés et mélangés avec de l'eau pour obtenir une teneur en eau de 34%, ce qui est approximativement celle retrouvée sur le terrain (Golder, 2014). Au total, environ 73 kg de mélange résidus-eau ont été versés dans la cellule dans laquelle la membrane semi-flexible et le géotextile étaient déjà mis en place.

Les résidus sont consolidés sous leur propre poids et la majorité de l'eau excédentaire à la surface est recueillie à l'aide d'une pipette. Une mince couche d'eau est laissée en surface pour éviter la désaturation des résidus. Ensuite, la pression choisie est appliquée avec le compresseur hydraulique calibré et est mesurée au bas de la cellule. Les résidus se consolident alors sous cette pression. Lorsque le processus de consolidation est terminé, le centre de la plaque supérieure de la cellule est enlevé pour créer une ouverture pour le cône. Celui-ci est alors placé sur le support juste au-dessus de la cellule. Il est ensuite enfoncé à l'aide d'un autre compresseur dans les premiers centimètres de l'échantillon pour commencer le test et mesurer q_c et f_s près de la mi-hauteur de la cellule. Lorsque le cône est en place, le système d'acquisition est programmé d'enregistrer 8 données de q_c et f_s par secondes. Ce nombre a été déterminé de façon arbitraire; des essais ont été réalisés avec 4 lectures par secondes et il a été remarqué que les valeurs maximales de q_c et f_s n'étaient pas enregistrées, elles se trouvaient entre deux données sauvegardées. Plus de données par secondes permettrait une meilleure analyse du développement de q_c et f_s , mais cela alourdirait le programme d'acquisition. Lorsque le système d'acquisition démarre, le cône est poussé dans le sol à la vitesse constante standard de 20 mm/s sur une profondeur d'environ 15 cm. Il est ensuite retiré à la même vitesse et le système d'acquisition est arrêté. Les capteurs de pression de la cellule sont fonctionnels durant tout ce processus; il est

donc possible d'observer les variations de pression durant la consolidation ainsi que durant l'essai de pénétration.

Après chaque essai, le cône est retiré du support, la pression de consolidation est enlevée et un échantillon est pris pour mesurer la teneur en eau. Le reste du sol est retiré de la cellule et est remis dans les chaudières où il est mélangé à nouveau avec de l'eau pour obtenir la teneur en eau initiale de 34%. Il est important de démonter l'appareil et mélanger les résidus car il a été remarqué que ceux-ci deviennent très rigides, même à de basses contraintes, et le trou formé par le cône à la suite de l'essai ne se referme pas complètement quand une pression additionnelle est appliquée.

Cette procédure est répétée pour chaque essais CPT sous les différentes pressions de consolidation choisies : 20, 40, 60, 80 et 100 kPa. Les étapes de cette préparation sont illustrées en Annexe 2. Il n'a pas été possible de réaliser ces essais à des pressions plus élevées à cause de la capacité du compresseur hydraulique et du fait que les résidus sont très compressibles. En effet, la conception de l'appareil ne permet pas d'avoir autant de déplacement vertical; si la plaque qui transfère les charges à l'échantillon descendait trop bas, elle ne serait plus en contact avec la base du bras de levier.

4.1.2.4 Résultats des essais CPT en laboratoire

Les données recueillies durant le processus de consolidation sont montrées dans le Tableau A3-1 en Annexe 3. Ces données ont été utiles pour déterminer quand les résidus étaient consolidés pour pouvoir passer à l'essai de pénétration au cône.

Au total 11 essais CPT ont été réalisés, mais seulement 5 résultats ont été retenus. Divers problèmes expérimentaux, tels qu'un mauvais fonctionnement ou des bris d'équipement, ont fait en sorte que les 6 autres essais donnaient des résultats en dehors de la tendance remarquée. Les résultats CPT en laboratoire retenus sont illustrés sur la Figure 4-6. Ceux-ci représentent les valeurs maximales de q_c et f_s mesurées par le cône durant la pénétration sur une profondeur d'environ 15 cm. Le cône n'était pas équipé pour mesurer les pressions interstitielles, il a donc été assumé que ces pressions sont hydrostatiques lors des essais CPT, effectués lorsque les résidus étaient normalement consolidés.

Les contraintes effectives verticales moyennes σ'_v ont été calculées et vérifiées avec les capteurs de pression au bas de la cellule. Ces contraintes effectives verticales moyennes atteintes au centre de la cellule sont légèrement différentes des contraintes verticales visées de 20, 40, 60, 80 et 100 kPa à cause du manque de précision des lectures de pressions appliquées du compresseur hydraulique. Cependant, cela n'affecte pas l'analyse. À l'aide d'un indicateur à cadran mesurant les déplacements verticaux de la plaque de chargement, il a été possible de confirmer que la consolidation était terminée avant chaque essai CPT. Tel que mentionné précédemment, pour l'interprétation des résultats, la pression interstitielle est assumée d'être hydrostatique considérant que le sol a eu le temps de consolider (généralement 48 h) et que suffisamment de drainage dans la cellule était disponible pour que l'excès puisse se dissiper.

Les contraintes horizontales moyennes ont été obtenues à partir des capteurs de pression sur la paroi de la cellule. La teneur en eau, w , tel que mentionné précédemment, a été mesurée à la fin du test CPT et variait entre 22.4% pour l'essai avec une contrainte de 23.60 kPa et 19.4% pour l'essai avec une contrainte de 109.82 kPa. Le Tableau 4-1 résume les données obtenues durant l'essai CPT en laboratoire.

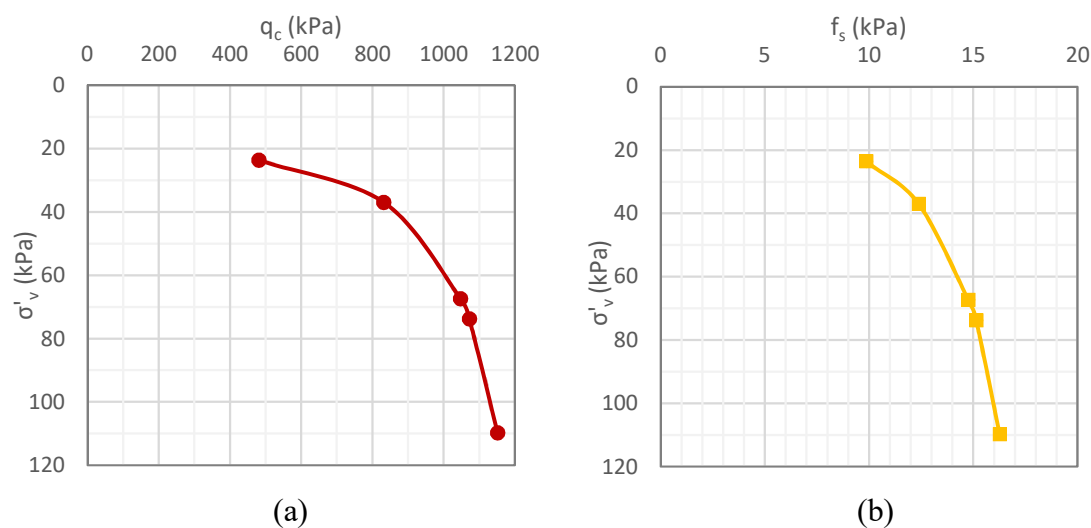


Figure 4-6 : Résultats de laboratoire; (a) la résistance en pointe du cône en fonction de la contrainte imposée, (b) le frottement sur le manchon du cône en fonction de la contrainte imposée

Tableau 4-1 : Données de l'essai CPT en laboratoire

σ'_v visée (kPa)	σ'_v obtenue (kPa)	σ_h (kPa)	σ_h après pénétration (kPa)	q_c (kPa)	f_s (kPa)	w_f (%)
20	23.60	10.58	15.18	481.22	9.87	22.4
40	36.98	16.86	25.46	832.03	12.38	21.5
60	67.36	30.15	39.55	1046.83	14.76	21.1
80	73.79	33.24	42.12	1072.06	15.14	20.3
100	109.82	49.89	57.06	1151.79	16.26	19.4

4.2 Essais sur le site Canadian Malartic

Des essais de pénétration au cône ont été effectués en 2013 et 2016 dans le parc à résidus de la mine Canadian Malartic. Les sections suivantes présentent les emplacements et la méthodologie de ces essais ainsi que des résultats représentatifs en 2013 et 2016.

4.2.1 Essais CPTu en 2013

4.2.1.1 Généralités

La compagnie ConeTec a été mandatée par Golder Associés pour réaliser des essais CPTu à divers emplacements dans le parc à résidus de Canadian Malartic (Golder, 2014). Six essais au piézocône ont eu lieu les 28 et 29 août 2013 aux emplacements indiqués sur la Figure 4-7.

Tel qu'illustré sur la Figure 4-8, des routes d'accès en stériles miniers ont été construites pour permettre l'installation de la machine de ConeTec et ainsi réaliser les essais. Des stériles ont été placés tout autour du point auquel l'essai a eu lieu pour éviter que le cône aille à pénétrer ce matériau très dur. Le cône utilisé pour ces essais avait une pointe de 15 cm², un manchon de 225 cm² et le capteur de pression interstitielle était installé à la base du cône (Type 2) (ConeTec, 2013). Le cône a été enfoncé dans le sol à la vitesse standard de 20 mm/s sur une profondeur qui variait de 9.70 à 21.95 m. La procédure de l'essai de pénétration au cône décrite dans la norme ASTM D5778 (2012) a été suivie (ConeTec, 2013).

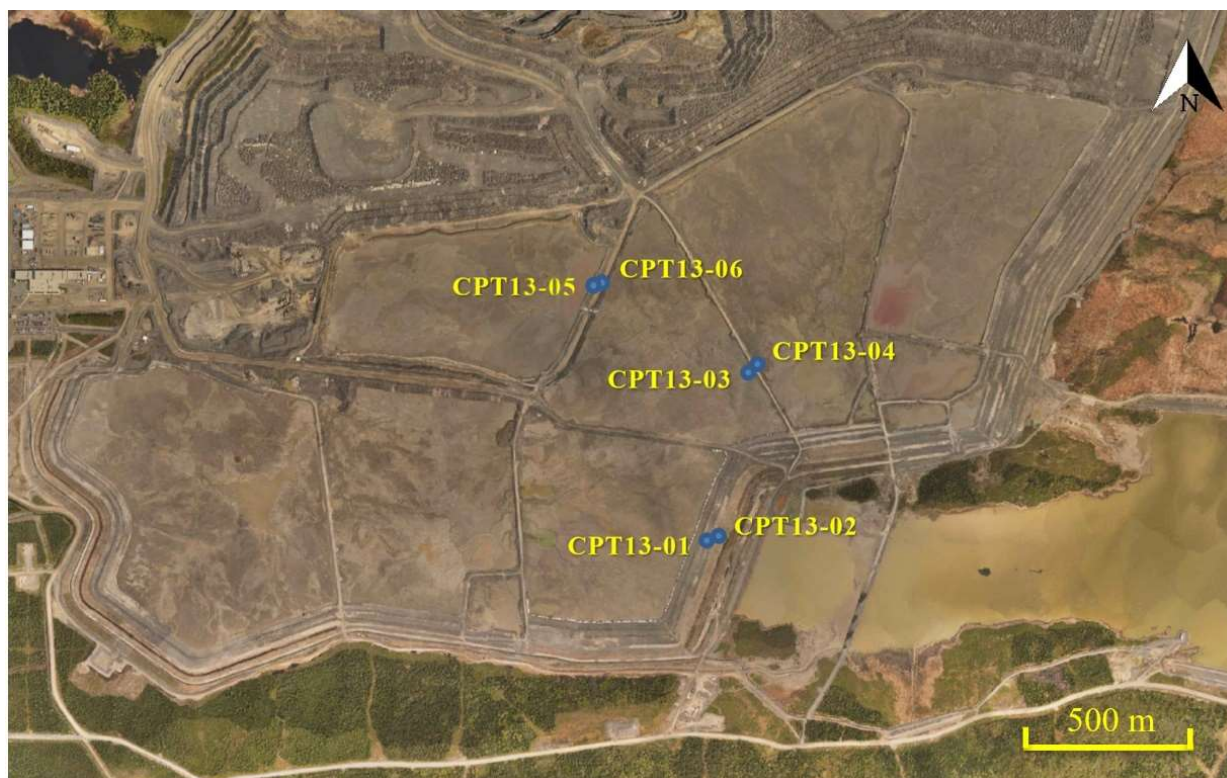


Figure 4-7 : Localisation des essais CPTu en 2013 dans le parc à résidus de Canadian Malartic (modifié de Golder, 2014)



Figure 4-8 : Route d'accès pour l'essai CPT13-01 (Golder, 2014)

4.2.1.2 Résultats en 2013

Les graphiques représentant les lectures de résistance en pointe, frottement sur le manchon, ainsi que la pression interstitielle en fonction de l'élévation du CPT13-01 sont présentés sur la Figure 4-9. L'indice des matériaux tel que défini par Davies (1999) est aussi inclus dans la figure. Il est important de noter qu'une influence de la présence des stériles, déposés pour éviter l'enfoncement de l'équipement, sur les résultats est remarquée près de la surface des résidus. C'est pourquoi une couche d'environ 3 m d'épaisseur de chaque essai a été ignorée dans l'analyse.

Il peut être remarqué que la résistance en pointe varie considérablement sur toute la profondeur de l'essai mais ne va pas au-delà de 3 100 kPa ce qui est semblable aux valeurs obtenues dans un silt mou (Lunne et al., 1997). Cette variation est courante et est due à la méthode de déposition qui cause la stratification de résidus avec différents degrés de consolidation (Ulrich & Hughes, 1994; Mlynarek et al., 1998). La friction sur le manchon est faible, généralement sous 20 kPa sauf entre les élévations 322 à 326 m où d'anciens dépôts de résidus se trouvent sur de l'argile (Golder, 2014). La pression interstitielle est, sur la majorité de la profondeur, au-dessus de la pression hydrostatique. Des tests de dissipation ont été réalisés à différentes élévations, mais c'est seulement à quelques-unes d'entre elles qu'un plateau a été atteint. Les valeurs de u à l'équilibre sont également indiquées sur la Figure 4-9 (c). Il peut être remarqué que l'indice des comportements des sols tel que défini par Davies (1999) varie généralement entre 2.25 et 3.0 sur toute la profondeur, ce qui classe les résidus comme des silts et des argiles. La pression interstitielle hydrostatique a été calculée en posant l'hypothèse que le niveau phréatique est à 1.5 m de profondeur, ce qui est similaire à ce qui a été mesuré en 2016. Les résultats de tous les essais CPTu réalisés en 2013 sont présentés dans l'Annexe 6.

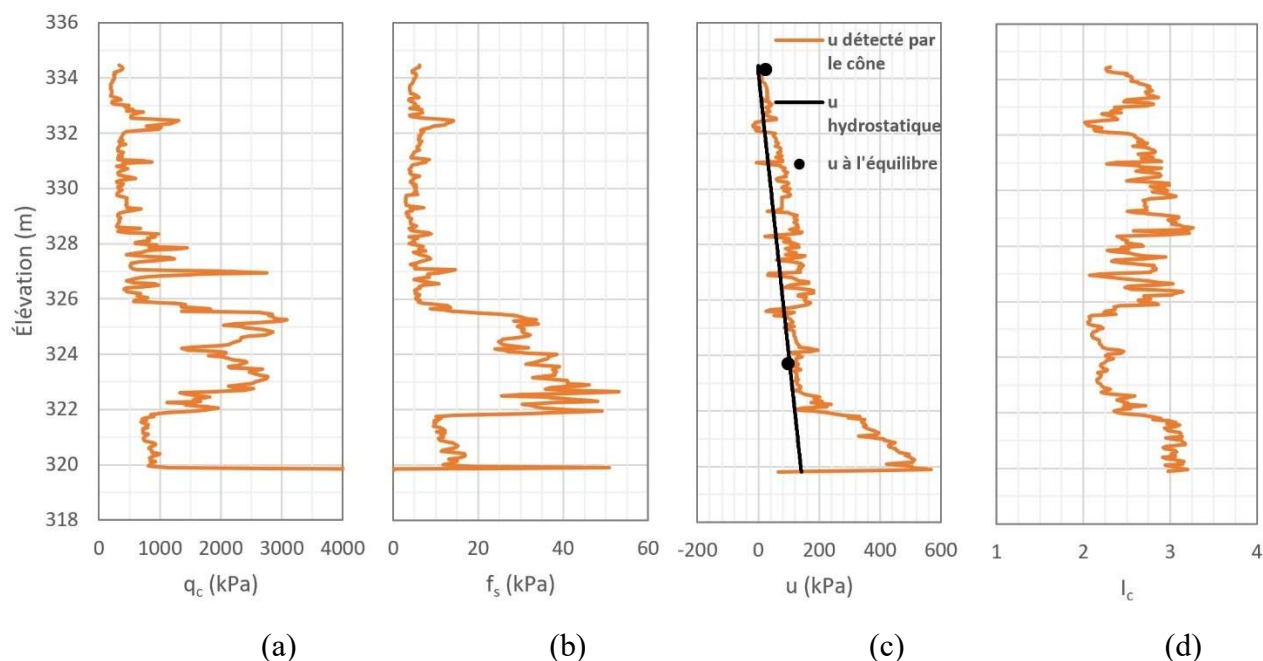


Figure 4-9 : Résultats typiques du CPTu dans le parc à résidus de Canadian Malartic en 2013; (a) résistance en pointe; (b) frottement sur le manchon; (c) pressions interstitielles; (d) indice de comportement des sols

4.2.2 Essais CPTu/SCPTu en 2016

4.2.2.1 Généralités

La compagnie ConeTec a été mandatée par Golder Associés en 2016 pour réaliser des essais CPTu et SCPTu à quelques emplacements dans le parc à résidus de Canadian Malartic (ConeTec, 2016). Six essais au piézocône sismique (SCPTu) et deux essais au piézocône (CPTu) ont eu lieu entre le 22 et 26 novembre 2016 aux emplacements identifiés sur la Figure 4-10 (SCPTu en rouge et CPTu en bleu).

L'installation de la machine ConeTec a été effectuée de façon similaire à celle de 2013. Il a encore une fois été remarqué que les stériles installés sur le dessus des résidus avaient une influence sur les données. Donc, une couche d'environ 3 m de chaque essai n'a pas été considérée dans l'analyse.

Le cône utilisé avait une pointe de 15 cm², un manchon de 225 cm² et le capteur de pression interstitielle installé à la base du cône (Type 2), ce qui est identique à ce qui a été utilisé en 2013.

Le cône a été enfoncé le sol à la vitesse de 20 mm/s sur une profondeur qui variait de 9.50 à 41.15 m. La même procédure pour effectuer l'essai de pénétration au cône qu'en 2013 a été suivie (ConeTec, 2016).

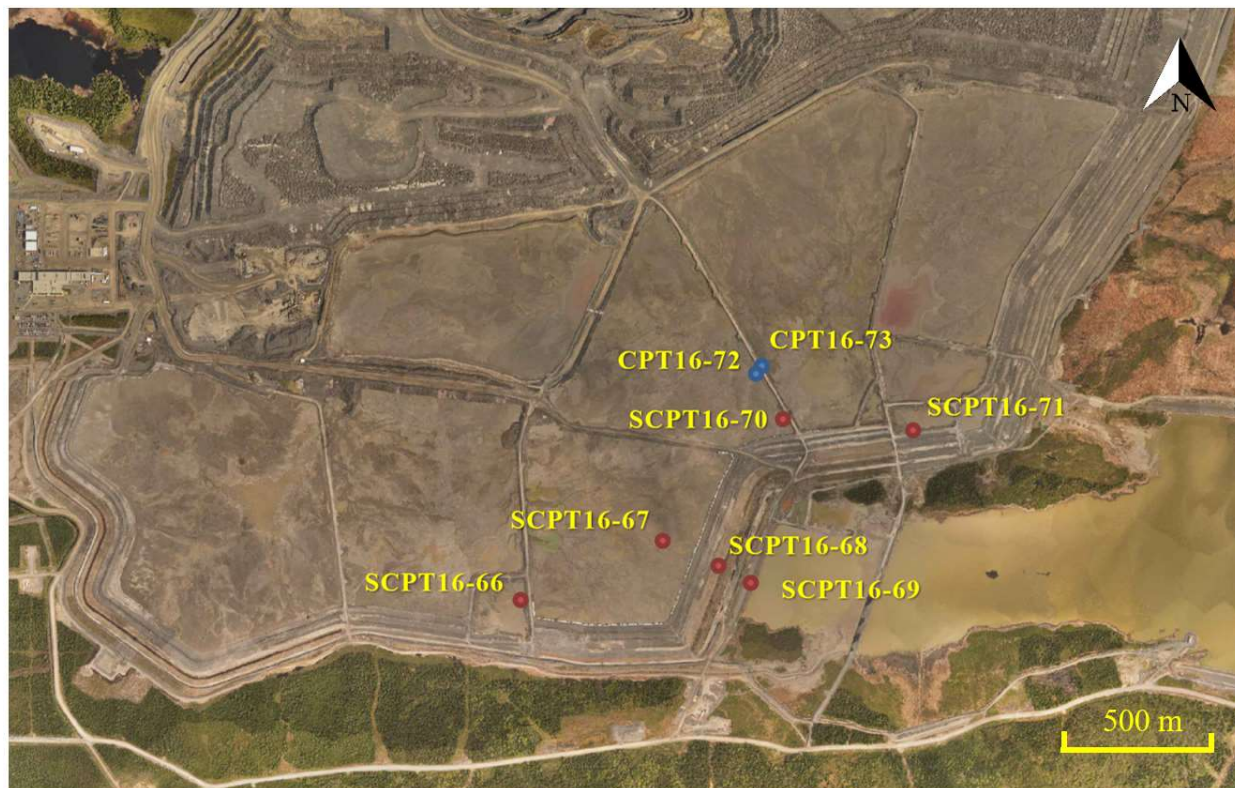


Figure 4-10 : Localisation des essais CPTu et SCPTu en 2016 dans le parc à résidus de Canadian Malartic (modifié de Golder, 2014)

4.2.2.2 Résultats en 2016

Les graphiques des lectures de q_c , f_s , u et I_c en fonction de l'élévation du SCPT16-67 sont présentés sur la Figure 4-11. L'essai SCPT16-67 est le test qui a été effectué le plus loin des inclusions et des digues dans la campagne de 2016 tel qu'il peut être remarqué sur la Figure 4-10.

Il peut être remarqué que la résistance en pointe ne dépasse généralement pas 5 000 kPa et qu'elle varie considérablement. La friction sur le manchon est relativement faible, généralement sous 50 kPa. La pression interstitielle est généralement au-dessus de la pression hydrostatique et celle-ci a été calculée à partir de la profondeur de la nappe phréatique déterminée par ConeTec durant les essais de dissipation. Les données d'essais de dissipation sont indiquées sur la Figure 4-11 (c) aux élévations où u à l'équilibre a été atteint. Les profondeurs de la nappe phréatique déterminées

par ConeTec variaient entre 1.5 et 2.4 m dépendamment de l'emplacement de l'essai (ConeTec, 2016). Il peut être remarqué que l'indice des comportements des sols tel que défini par Davies (1999) varie entre 2.25 et 3.25 sur la majorité de la profondeur, ce qui classifie les résidus comme des silts et des argiles. Les résultats de tous les essais SCPTu et CPTu réalisés en 2016 sont présentés en Annexe 7.

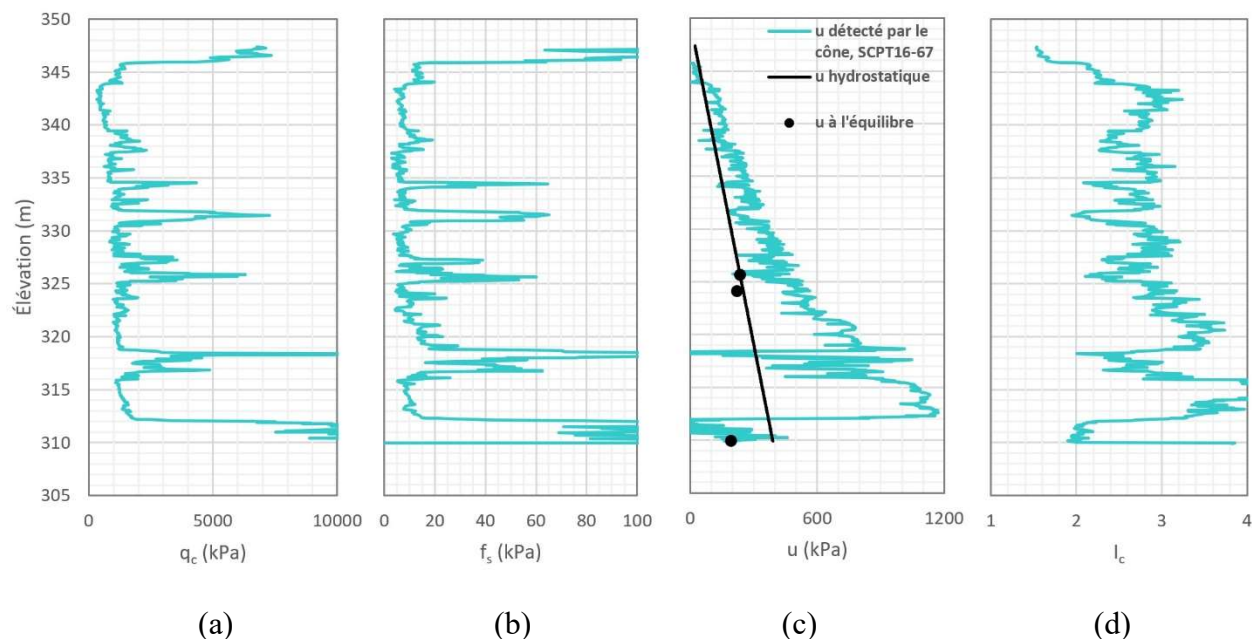


Figure 4-11 : Résultats typiques d'un essai de pénétration au cône dans le parc à résidus de Canadian Malartic en 2016; (a) résistance en pointe; (b) frottement sur le manchon; (c) pression interstitielle; (d) indice de comportement des sols

CHAPITRE 5 ANALYSE DES RÉSULTATS

5.1 Généralités

Dans ce chapitre, l'applicabilité des corrélations existantes reliant les mesures du CPT aux propriétés des résidus miniers de Canadian Malartic est évaluée. Pour cette analyse, les résultats obtenus en laboratoire à l'aide de la cellule de simulation CPT ainsi que les données de terrain ont été utilisés. L'hypothèse que la pression est hydrostatique dans la cellule et sur le terrain a été employée à défaut d'avoir des mesures de pressions hydrostatiques à l'équilibre et cette hypothèse est validée dans la section 5.4. En effet, la cellule de simulation CPT n'est pas équipée pour détecter ces pressions, mais, tel que mentionné précédemment, il a été possible d'observer le processus de consolidation et d'effectuer l'essai CPT une fois la consolidation complétée ($u \approx u_0$). Dans le cas des résidus miniers du parc à résidus, malgré que des essais de dissipation ont été effectués sur le terrain à différentes élévations (environ 6 par essais CPTu), la pression mesurée n'a pas atteint de plateau sauf aux élévations où le cône mesurait déjà que u est presque égal à u_0 (0 à 4 plateaux obtenus par essai CPTu). Cela n'a donc pas permis d'approximer un profile de la pression interstitielle *in situ* en fonction de l'élévation et de l'utiliser pour l'analyse. Il est connu que la pression interstitielle en excès est générée lors de la pénétration du cône et donc la mesure de u par le cône ne peut pas être considérée comme étant égale à $u_{in situ}$. De plus, le degré de consolidation des résidus miniers ne peut pas être calculé, donc il n'est pas possible d'estimer la pression interstitielle à partir de U .

Pour l'analyse, les résidus aux élévations où la pression interstitielle mesurée est égale à la pression hydrostatique sont considérés d'être « normalement consolidés » alors qu'aux élévations où la pression interstitielle mesurée est plus grande que la pression hydrostatique, les résidus sont considérés comme étant « sous-consolidés » (voir section 2.3.2.10).

5.2 Analyse des résultats CPT de laboratoire

5.2.1 L'effet de confinement de la cellule

L'effet de confinement de la cellule doit être investigué dans le but de valider l'exactitude des mesures de résistance en pointe et de frottement sur le manchon durant l'essai CPT en laboratoire. À partir de l'information obtenue grâce aux capteurs de pression sur la paroi ainsi

qu'au bas de la cellule, il est possible de calculer le ratio de la contrainte horizontale effective sur la contrainte verticale effective K des résidus aux différents paliers de contraintes. En moyenne, le K obtenu pour les 5 paliers est de 0.40, ce qui est similaire au coefficient des terres au repos K_0 de 0.384 calculé à partir de l'angle de frottement interne de 38° obtenu par Grimard et al. (2017) et l'équation [5-1] :

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad [5-1]$$

Il peut être observé sur la Figure 5-1 que pour les sols sans cohésion, le K_0 se situe généralement entre 0.4 et 0.6 (Bowles, 1997). Considérant que le K moyen de 0.40 obtenu en laboratoire dans la cellule de simulation CPT est dans cet intervalle de K_0 et est similaire au K_0 de 0.384 obtenu avec l'angle de frottement interne de Grimard et al. (2017), il est raisonnable de conclure que l'effet de confinement de la cellule est négligeable lors de la pénétration du cône et que les mesures de q_c et f_s ne sont pas influencées. En effet, si la cellule rigide était trop petite, un plus grand ratio de contraintes serait remarqué et donc K serait plus près de la valeur du coefficient de butée. Si la membrane était trop flexible, l'effet inverse serait remarqué avec un K près de la valeur du coefficient de poussée. La variation du K à chaque palier est montrée dans le Tableau 5-1 de la section suivante.

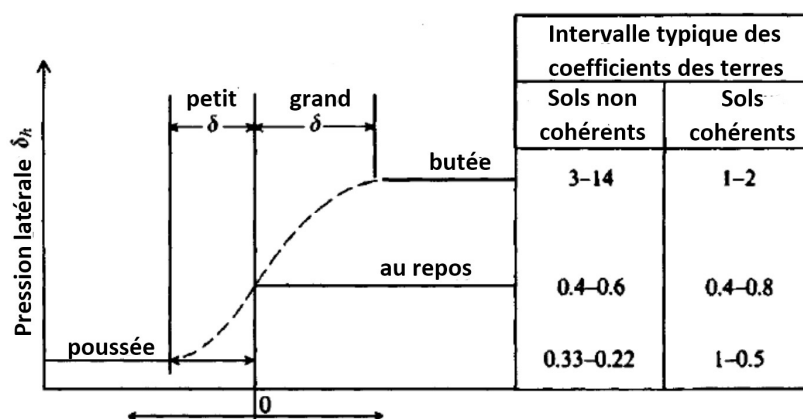


Figure 5-1 : Intervalle typique des coefficients des terres au repos (Bowles, 1997)

5.2.2 Paramètres et propriétés déterminées durant l'essai CPT de laboratoire

À partir des valeurs de D_r et e_{max} trouvées lors des essais conventionnels de laboratoire ainsi que la teneur en eau finale, w_f , de l'échantillon lors des essais CPT en laboratoire, il est possible de déterminer l'indice des vides final, e_f , des résidus de la cellule CPT et l'indice de densité relative.

Les valeurs obtenues pour chacun des paliers de contraintes ainsi que toutes les données reliées à l'essai CPT de laboratoire sont résumées dans le Tableau 5-1.

Tableau 5-1 : Ensemble des données obtenues pour les essais CPT en laboratoire

σ'_v visée (kPa)	σ'_v obtenue (kPa)	σ_h (kPa)	σ'_h (kPa)	K	σ_h après pénétration (kPa)	q_c (kPa)	f_s (kPa)	w_f (%)	e_f	I_D
20	23.6	10.58	8.13	0.34	15.18	481.22	9.87	22.4	0.61	89.5
40	36.98	16.86	14.41	0.39	25.46	832.03	12.38	21.5	0.58	91.9
60	67.36	30.15	27.7	0.41	39.55	1046.83	14.76	21.1	0.57	93.0
80	73.79	33.24	30.79	0.42	42.12	1072.06	15.14	20.3	0.55	95.1
100	109.82	49.89	47.44	0.43	57.06	1151.79	16.26	19.4	0.53	97.5

5.3 Validation des corrélations existantes

Une comparaison est présentée dans cette section entre les résultats obtenus dans les essais conventionnels de laboratoire, ceux obtenus avec l'appareil de simulation CPT, ainsi que ceux provenant du terrain. Cette comparaison vise à valider l'applicabilité des corrélations existantes reliant les propriétés des sols aux lectures CPT pour les résidus miniers de Canadian Malartic. Le SCPT16-67 et le SCPT16-71 ont été utilisés pour cette analyse. Les mesures de q_c , f_s , u et le I_c de ces essais sont montrées dans les figures ci-dessous.

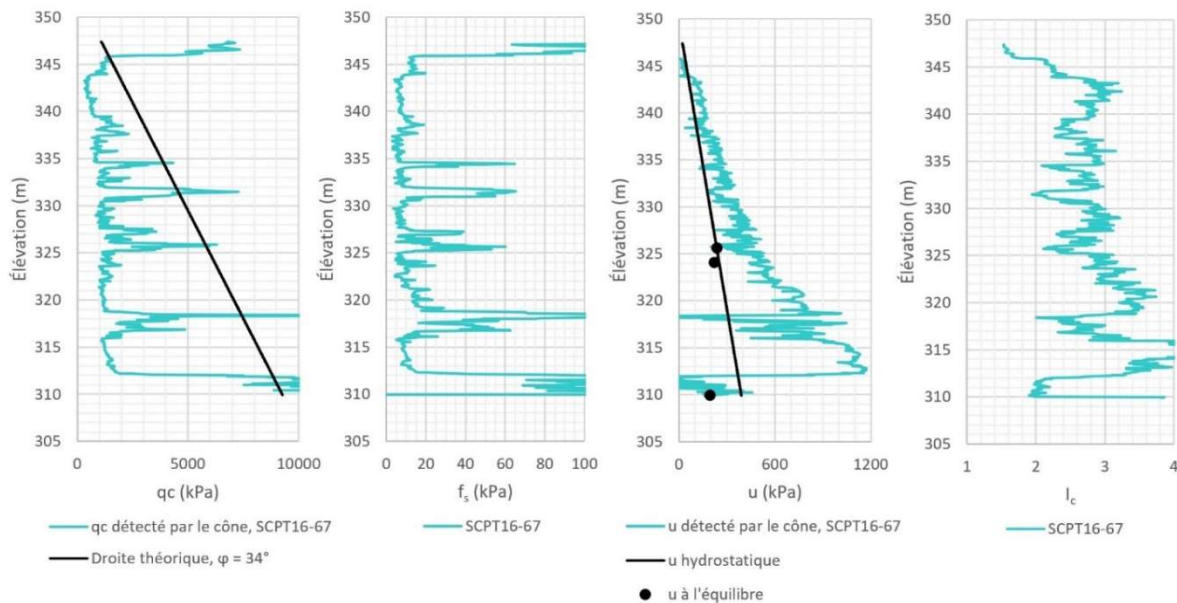


Figure 5-2 : Mesures obtenues durant l'essai SCPT16-67

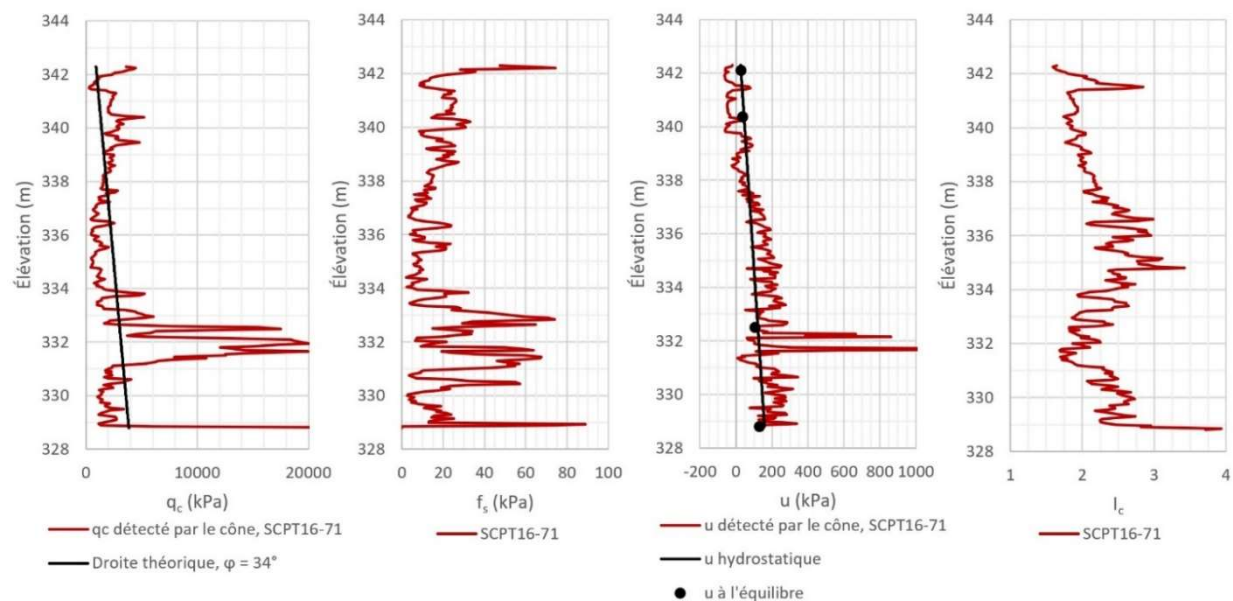


Figure 5-3 : Mesures obtenues durant l'essai SCPT16-71

5.3.1 Identification et classification des sols

À l'aide du système de classification USCS, il est possible de classer les résidus selon leur granulométrie et leur plasticité, alors qu'avec le système SBTn (basé sur les lectures CPTu), la classification caractérise seulement le comportement des sols. Tel que mentionné dans le Chapitre 2, Robertson (1990, 2010, 2016) s'est basé sur des généralisations des comportements des sols naturels pour créer des catégories (1 à 9) reliant les lectures du cône à la réponse du sol. L'auteur indique lui-même que le graphique de classification SBTn ne peut pas fournir des prédictions précises sur le type de sol, seulement sur son comportement. Également, il indique que les facteurs tels que l'historique des contraintes, les contraintes *in situ*, la sensibilité et la rigidité du sol ainsi que son indice des vides ont tous une influence sur la classification par CPTu (Robertson, 1990). Robertson (2010) indique aussi que son système SBTn n'est pas toujours en accord avec le système USCS et que la plus grande différence dans la classification entre ces deux systèmes concerne les sols qui ont un mélange de grosseurs de particules tels que les sables silteux, silts sableux et silts argileux.

Dans le but d'évaluer l'applicabilité du système de classification SBTn de Robertson sur les résidus miniers de Canadian Malartic, une analyse des lectures du cône lors de l'essai SCPT16-67 ainsi que les lectures obtenues en laboratoire ont été utilisées. L'essai SCPT16-67 a

été choisi car c'est l'emplacement d'essai SCPTu/CPTu le plus éloigné des digues et des inclusions dans la campagne de 2016; cela permet donc d'éliminer l'impact de ces ouvrages sur les lectures obtenues. De plus, selon le rapport de ConeTec, aucun problème lors de l'exécution de l'essai SCPT16-67 n'a eu lieu, contrairement aux essais SCPT16-66 et SCPT16-68 où les lectures ont dû être interrompues autour de 10 m de profondeur. Tous les calculs pour permettre la classification des résidus avec le système SBTn ont été faits en accord avec les équations présentées au Chapitre 2 et celles dans les articles de Robertson (1990; 2009; 2016). La pression hydrostatique a été calculée à l'aide des données fournies par ConeTec par rapport à la profondeur de la nappe phréatique. Le poids volumique utilisé dans le calcul des contraintes totales verticales est celui obtenu en laboratoire (20.50 kN/m^3). L'utilisation de ce poids volumique sur toute la profondeur de l'essai est jugée appropriée considérant que les résidus dans la cellule CPT de laboratoire ont un indice de densité qui varie légèrement pour des contraintes entre 20 kPa et 110 kPa. De plus, la densité atteinte à 110 kPa est proche de la densité maximale de ce matériau ($I_D = 97.5\%$). Les poids volumiques du terrain devraient donc être similaires à ceux de laboratoire. Une teneur en eau d'environ 27% a été obtenue à partir d'échantillons pris à la surface du parc à résidus de Canadian Malartic ce qui correspond à un poids volumique de 19.50 kN/m^3 (Golder, 2014). Cette valeur obtenue sur le terrain est similaire à la valeur utilisée dans l'analyse confirmant que cette estimation est appropriée.

Sur la Figure 5-4, les couches de résidus sous-consolidés du SCPT16-67 (où $u > u_0$ sur la Figure 5-2) sont classées dans les types de comportement allant des sols fins et sensibles jusqu'aux sables, alors que les résidus normalement consolidés du SCPT16-67 (où $u = u_0$ sur la Figure 5-2) et du laboratoire sont classés correctement dans la zone 4 (mélanges de silts normalement consolidés) sur la Figure 5-5.

Cette disparité dans la classification sur la Figure 5-4 est due au fait que les résidus sont sous-consolidés et non normalement ou surconsolidés tel qu'assumé par Robertson lors de la création de ses corrélations. En effet, la méthode de classification de Robertson ne peut pas faire la différence entre plusieurs types de comportement des sols et la variation du degré de consolidation à travers les couches des mêmes résidus car l'hypothèse de base de son système est que le sol est déjà consolidé. Ceci fait en sorte que toute variation en q_c , f_s et u est interprétée comme étant un signe de différents comportements de sols naturels, alors qu'en fait, il s'agit d'une indication du degré de consolidation des résidus qui vont avoir, éventuellement, le même

type de comportement une fois consolidés. Il est donc important lors de l'interprétation des données CPTu de ne pas associer les propriétés, les caractéristiques et les généralisations, initialement déterminées par Robertson pour chaque zone de son graphique SBTn, aux propriétés et caractéristiques mécaniques des résidus miniers. Ceux-ci ne sont ni des sols naturels, ni des sols consolidés, ce qui fausse les hypothèses des zones de classification. En d'autres mots, si par exemple, les lectures de q_c et f_s sont faibles, celles de u élevées et que la classification SBTn indique que les résidus se comportent comme une argile, cela ne signifie pas que les propriétés connues des argiles telles que leur très faible perméabilité, leur cohésion entre les particules, leur particules très fines et leur faible résistance en cisaillement avec un angle ϕ' petit peuvent être appliquées pour caractériser les résidus miniers. La conclusion à retenir serait simplement que la faible lecture de q_c, f_s et l'importante réponse de u à la pénétration indique que ce matériau non-naturel est sous-consolidé.

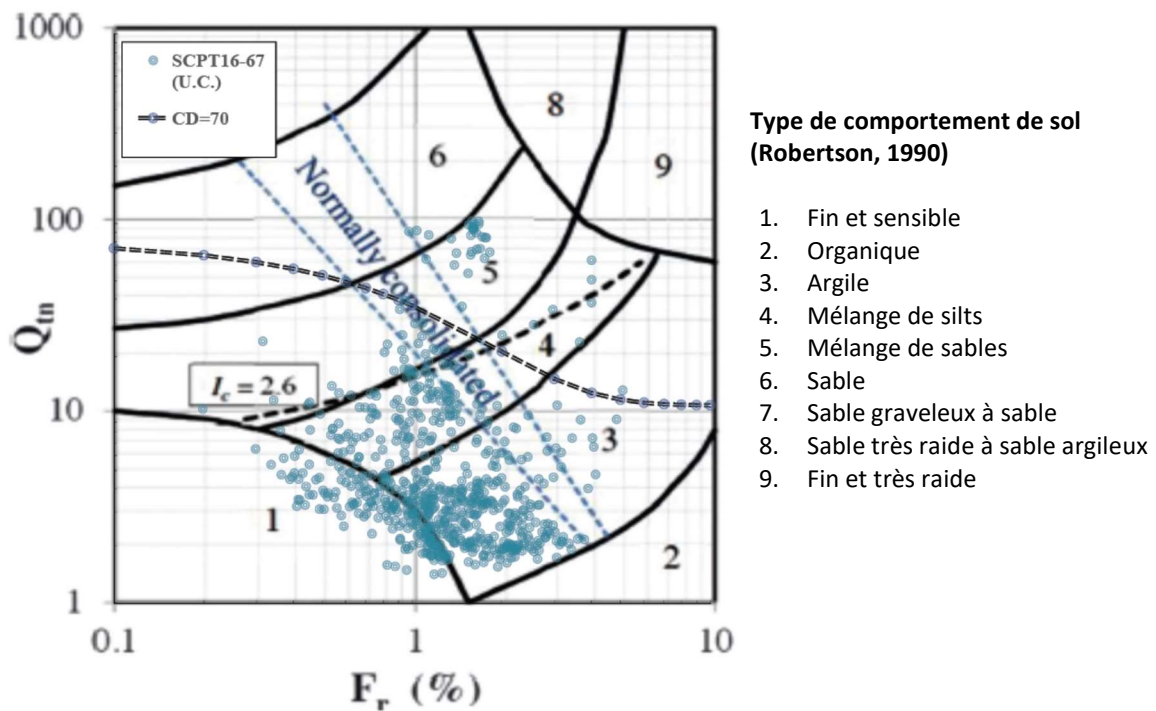


Figure 5-4 : Classification des résidus sous-consolidés du SCPT16-67 de Canadian Malartic dans le graphique de Robertson (2016)

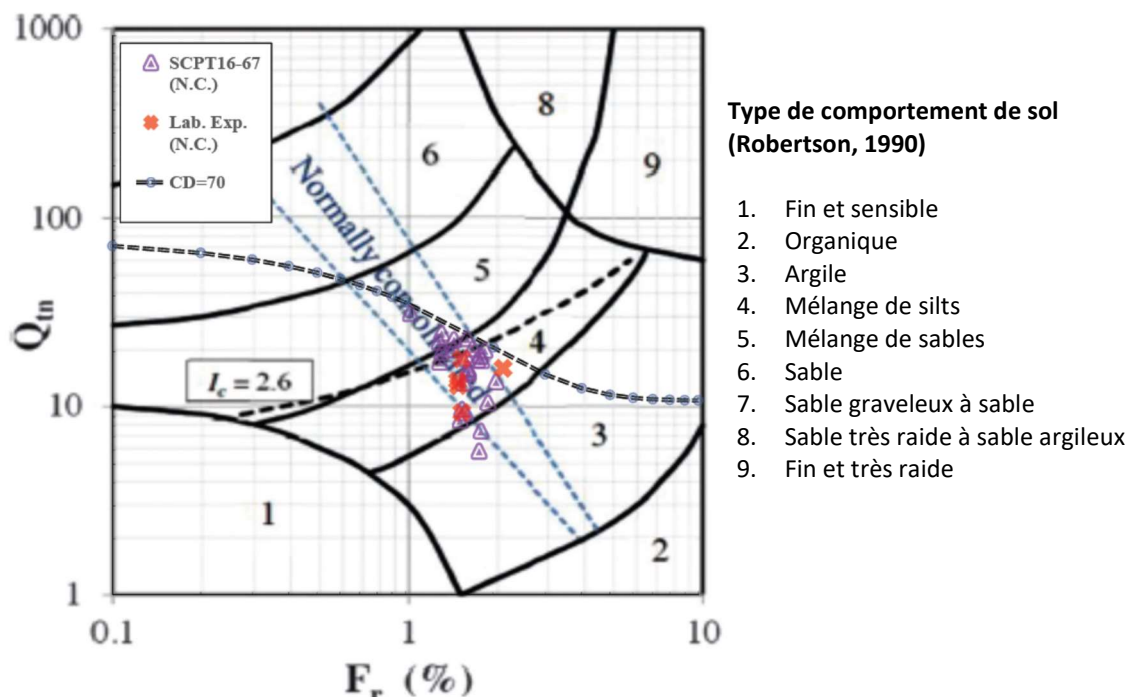


Figure 5-5 : Classification des résidus normalement consolidés dans le laboratoire et sur le terrain du SCPT16-67 dans le graphique de Robertson (2016)

Le graphique de Davies (1999) modifié par Jefferies et Been (2006) semble à première vue mieux classer les résidus miniers de Canadian Malartic, mais encore une fois sans beaucoup de précision à cause de leur état sous-consolidé. En effet, tel qu'indiqué sur la Figure 5-6, le comportement des résidus est classé comme étant majoritairement celui de silts argileux et d'argiles silteux, alors que le type de comportement attendu basé sur leur granulométrie serait un silt sableux. Il n'est malheureusement pas possible de valider si les résultats CPT en laboratoire seraient classés correctement sur cette figure, car aucune lecture de pression interstitielle (u_2) n'a été obtenue durant l'essai. Cependant, il peut être remarqué que les couches de résidus normalement consolidées du SCPT16-67 (en bleu) ne sont pas toutes classées dans la même zone. Ceci indique que cette corrélation n'est pas applicable pour les résidus miniers de Canadian Malartic.

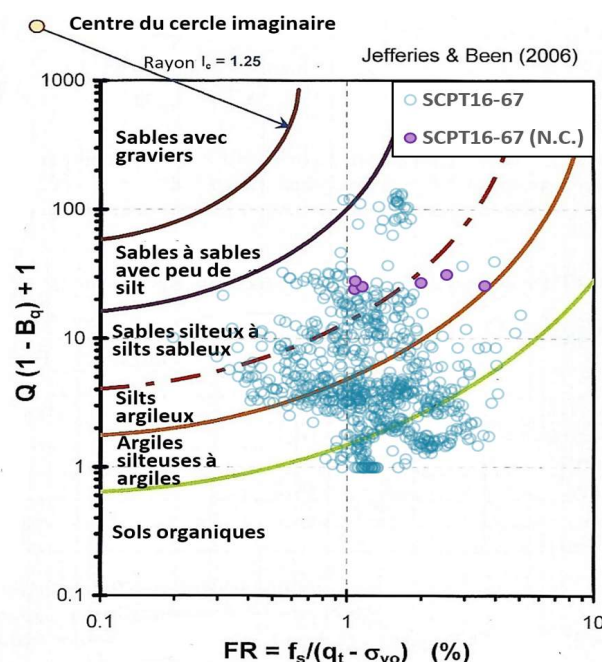


Figure 5-6 : Classification selon le graphique de Jefferies & Been (2006) (Mayne, 2013)

Ces résultats indiquent que les corrélations SBTn présentées dans cette section n'illustrent pas bien l'état de consolidation des résidus miniers et donc que leur utilisation, si nécessaire, doit être faite avec prudence. La corrélation de Robertson (1990) semble traiter la variation de degré de consolidation comme étant de différents comportements et la corrélation de Davies (1999) n'arrive pas à classer les résidus consolidés dans la même zone, donc son application sur les résidus sous-consolidés est questionnable. Il n'est ainsi pas recommandé d'utiliser ces méthodes de classification pour tirer des conclusions sur les propriétés des résidus miniers de Canadian Malartic.

5.3.2 Teneur en particules fines

La corrélation de Davies (1999) pour déterminer la teneur en particules fines à partir de l'indice des matériaux I_c a été testée pour les résidus miniers de Canadian Malartic. Une moyenne des valeurs de I_c à chaque mètre de profondeur a été utilisée pour limiter l'impact des pics des lectures de q_c qui sont causés par la présence de glace, des couches desséchées ou toute autre anomalie dans les résidus. La Figure 5-7 ci-dessous représente les teneurs en fines moyennes obtenues pour le SCPT16-67 et SCPT16-71. Cette méthode indique que la teneur en fines varie généralement entre 50 et 70%, mais en connaissant la granulométrie des résidus, une valeur plus près de 80 à 95% est attendue. En effet, d'après James et al. (2017), la granulométrie des résidus

avant 2013 était presque en totalité des particules fines alors qu'après 2013, le pourcentage de sable a augmenté jusqu'à 21%.

Cette mauvaise approximation de teneur en fines peut avoir un lien avec la méthode de déposition des résidus (ségrégation), mais provient surtout de la variation considérable de l'indice des matériaux à travers la profondeur de l'essai. Les résidus étudiés par Davies (1999) étaient de vieux dépôts qui étaient consolidés et avaient un I_c constant sur toute la profondeur des essais CPT. Cette variation de I_c dans le cas des résidus de Canadian Malartic est influencée par celle des lectures de q_c et u , ainsi que par les valeurs des contraintes assumées aux profondeurs testées. Une pression interstitielle hydrostatique a été assumée pour déterminer les contraintes effectives *in situ*. Il peut être remarqué que, même pour les résidus près d'être normalement consolidés (SCPT16-71), les teneurs en fines approximées sont erronées car les valeurs de I_c sont encore très variables (entre 2 et 3.5). Ceci indique que la corrélation de Davies (1999) n'est pas applicable pour les résidus de Canadian Malartic et que le I_c n'est pas un bon indice l'état de consolidation des résidus car il varie de façon considérable même quand les résidus sont presque consolidés. Il est toutefois intéressant de remarquer que la corrélation de Davies (1999) indique une augmentation en teneur en fines avec la profondeur et qu'en dessous de l'élévation 325 m, où se trouve la fondation en argile, la teneur en fines est autour de 80-90%. Ceci indique que cette corrélation donne des valeurs cohérentes de teneur en fines pour la fondation.

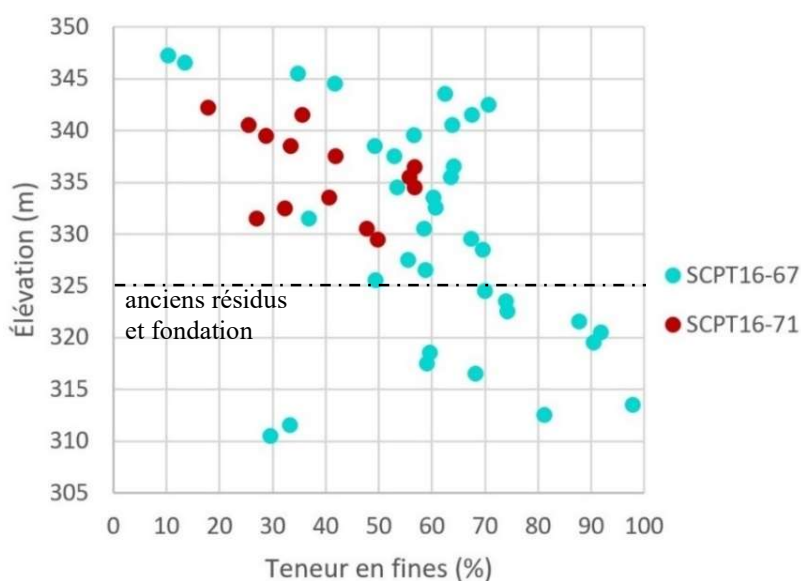


Figure 5-7 : Teneur en fines des résidus du SCPT16-67 et SCPT16-71 basée sur la méthode de Davies (1999) avec le I_c

5.3.3 Poids volumique

Tel que mentionné dans le Chapitre 2, le poids volumique peut être déterminé à l'aide de plusieurs corrélations. Il a été calculé pour les données du CPT en laboratoire avec l'équation [2-11] à partir de l'indice des vides final des résidus dans la cellule et le poids volumique saturé obtenu varie entre 20.25 et 20.80 kN/m³ pour des contraintes verticales effectives entre 23.6 et 109.82 kPa. Le poids volumique sec moyen, calculé à l'aide de l'équation [2-10] varie entre 16.54 et 17.42 kN/m³. Ces valeurs sont très semblables à celles trouvées dans la littérature pour les résidus miniers et les sols naturels de graduation similaire (Holtz et al., 2010; Bussière, 2007; Bolduc, 2012).

Les résultats des corrélations existantes reliant le CPT au poids volumique sont présentés dans les figures suivantes. Encore une fois, les résultats de l'essai SCPT16-67 ont été utilisés pour cette analyse. Il peut être remarqué sur la Figure 5-8 que la tendance des valeurs du poids volumique à l'aide des lectures de V_s semble concorder avec les tendances trouvées par Mayne (2013) pour les sols naturels. Il est important de noter que cette méthode requière de connaître l'état de contraintes effectives *in situ*. Il a été assumé que le poids volumique moyen est de 20.50 kN/m³ sur toute la profondeur pour calculer les contraintes totales et que la distribution de pressions interstitielles est hydrostatique pour pouvoir calculer les contraintes effectives. L'hypothèse d'approximation du γ_{sat} de 20.50 kN/m³ sur toute la profondeur est considérée valide tel qu'expliqué dans la section 5.3.1. Il est connu que l'hypothèse de la pression hydrostatique ne représente pas forcément les conditions sur le terrain, mais dans le but de faciliter les calculs, cette hypothèse est souvent employée.

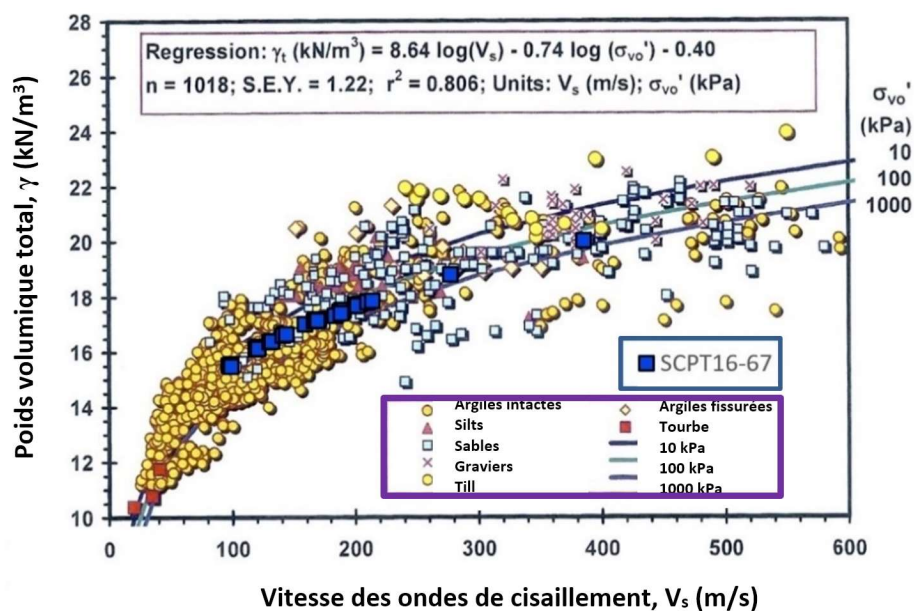


Figure 5-8 : Corrélation entre V_s , γ et σ'_{vo} (modifié de Mayne (2013))

Les deux méthodes de Mayne (2013) décrites dans les équations [2-12] et [2-13] ont été appliquées sur les données du SCPT16-67 et du laboratoire et ont été illustrées sur la Figure 5-9. En regardant cette figure, il peut être remarqué que la corrélation de Mayne (2013) en fonction de f_s suit une tendance similaire à celle en fonction de V_s , mais qu'elle donne de grandes variations du poids volumique qui ne sont pas aussi présentes dans les résultats obtenus avec les V_s . Il peut également être remarqué qu'avec les deux méthodes de Mayne (2013), des valeurs plus petites que la valeur du poids volumique minimal ont été obtenues pour σ'_{vo} plus petit que 150 kPa, ce qui indique que les corrélations sous-estiment γ . Effectivement, basé sur les données d'essais conventionnels en laboratoire pour déterminer e_{max} (état le plus lâche), il a été déterminé que le poids volumique minimal est autour de 16.47 kN/m³ (basé sur un $e_{max} = 1.52$ tel que déterminé lors de l'essai de masse volumique en condition non tassée en considérant un $D_r = 2.71$). Considérant que ces valeurs de e_{max} et D_r correspondent à celles trouvées dans la littérature pour ces résidus, des valeurs de γ aussi petites que 15.2 kN/m³ obtenues avec les corrélations de Mayne (2013) pour les résidus *in situ* démontrent que ces corrélations ne sont pas appropriées. Malgré le fait que ces résidus près de la surface ont été déposés dans les trois dernières années et donc qu'ils sont très sous-consolidés, il a été démontré en laboratoire que ces résidus atteignent un γ_{sat} de 20.25 kN/m³ à une contrainte effective verticale aussi petite que 23.6 kPa.

De plus, il peut être remarqué sur la Figure 5-9 que la corrélation de Mayne (2013) basée sur le f_s des résidus de la cellule de simulation CPT (en vert) ne donne pas des valeurs de γ_{sat} qui concordent avec celles déterminées avec l'équation [2-11] (en jaune) à partir de la densité relative connue. Ceci confirme que les corrélations de Mayne (2013) sous-estiment le poids volumique des résidus *in situ* et qu'une calibration de l'équation est nécessaire.

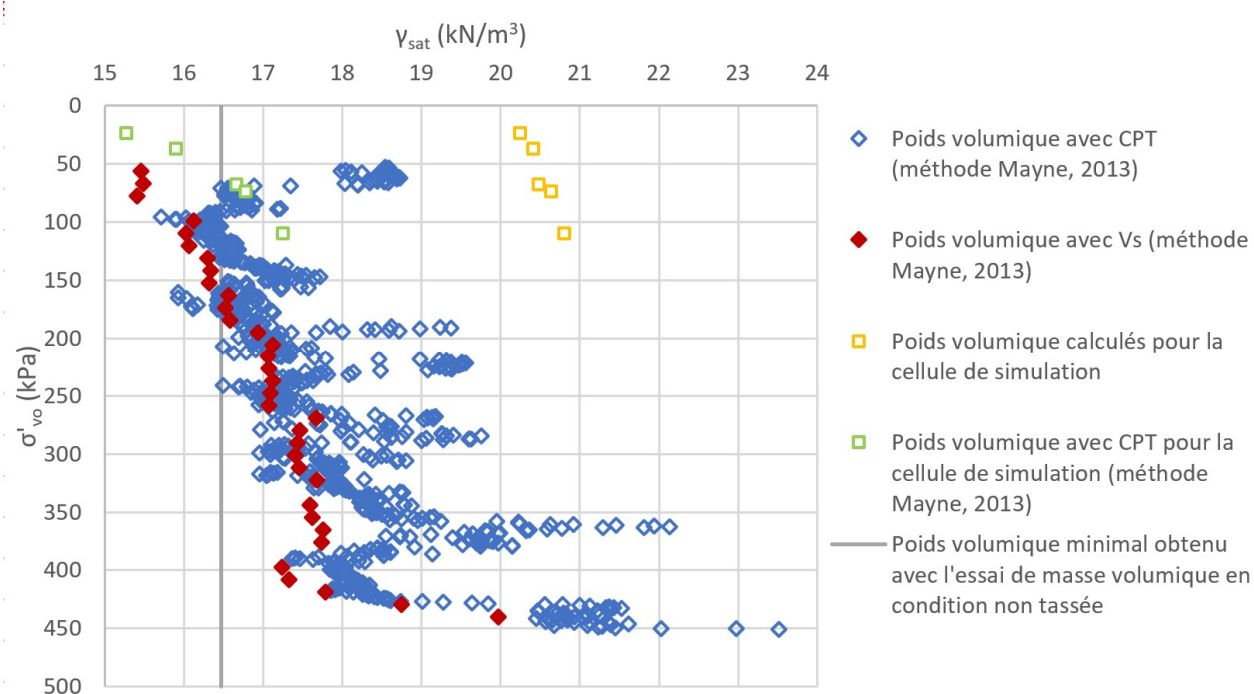


Figure 5-9 : Poids volumique saturé estimé à l'aide du CPT/SCPT

5.3.4 Indice de densité

L'indice de densité relative des résidus durant l'essai CPT en laboratoire a été déterminé à l'aide des valeurs connues de e_{min} et e_{max} . Celui-ci se trouve entre 89.5 et 97.5% pour les contraintes de 23.6 kPa à 109.82 kPa. En utilisant la corrélation de Robertson et Campanella (1986) qui relie q_c et I_D , il peut être remarqué sur la Figure 5-10 que les résultats obtenus à partir des données de terrain du SCPT16-67 et des données de laboratoire se trouvent à l'extrémité gauche du graphique, ce qui indiquerait un I_D plus petit que 40% sur toute la profondeur des essais. Puisque cette corrélation a été développée sur des sables de quartz normalement consolidés, son applicabilité sur les résidus sous-consolidés et normalement consolidés n'a jamais été prouvée. Il est raisonnable de conclure à partir de la Figure 5-10 que cette corrélation n'est pas applicable car elle sous-estime largement l'indice de densité des résidus en laboratoire et *in situ* également.

Comparée aux sables utilisés pour développer cette relation, la résistance en pointe dans les résidus est très faible, généralement plus petite que 100 bars (10 000 kPa). Les propriétés mécaniques de ces deux sols sont donc très différentes, c'est pourquoi cette corrélation ne peut pas être utilisée sur les résidus miniers de Canadian Malartic. De plus, une calibration serait difficile à obtenir considérant que seules 3 données d'essais en laboratoire sont dans l'intervalle d'applicabilité de cette corrélation. En effet, il peut être remarqué sur la Figure 5-10 que les courbes indiquant l'indice de densité commencent à 0.5 bar (50 kPa).

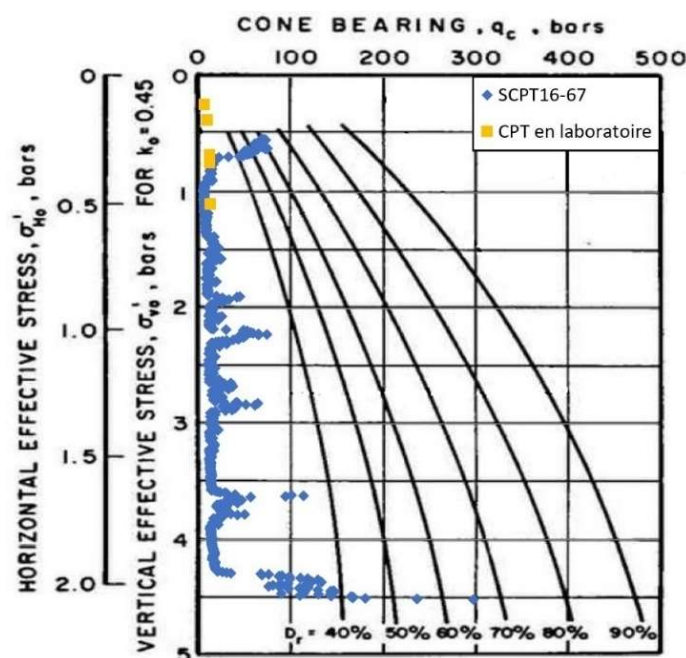


Figure 5-10 : Corrélation entre q_c et I_D appliquée sur les données SCPT16-67 et CPT en laboratoire (modifié de Robertson et Campanella (1986))

En observant la corrélation de Mayne (2006) basé sur celle développée par Jamiolkowski et al. (2001) sur les sables propres présenté dans le Chapitre 2, il peut être remarqué que la corrélation n'est également pas applicable aux résidus miniers de Canadian Malartic (voir Figure A5-1). En effet, les résidus se situent dans la catégorie des sols très compressibles (ligne verte de la Figure 2-11 et A7-1) et en normalisant q_t obtenu en laboratoire tel qu'indiqué dans la méthode, des valeurs très petites de I_D sont obtenues (entre 10 et 20%). Il est donc clair que les corrélations pour déterminer l'indice de densité impliquant des sables de quartz présentées dans ce mémoire ne sont pas applicables pour les résidus miniers de Canadian Malartic.

5.3.5 Résistance au cisaillement non drainé

Tel que mentionné au Chapitre 2, la résistance au cisaillement non drainé peut être estimée comme étant égale au frottement sur le manchon f_s . À l'aide des valeurs de f_s du SCPT16-67, un S_u variant majoritairement entre 5 et 30 kPa a été obtenu. En laboratoire, la résistance au cisaillement non drainé se trouve entre 10 et 16 kPa. Il n'est malheureusement pas possible de vérifier si ces valeurs concordent avec la véritable valeur de S_u des résidus miniers de Canadian Malartic, mais ces données sont en accord avec celles déterminées par Bussière (2007) ($S_u < 100$ kPa) pour des résidus miniers.

5.3.6 Angle de frottement interne effectif

La corrélation définie par Senneset et al. (1988, 1989) pour les silts et les argiles relie le Q_m du système de classification de Robertson (1990) (égal à N_m dans ce cas-ci, tel qu'expliqué dans le Chapitre 2) à l'indice B_q décrivant l'excès de pression d'eau mesuré par le CPTu et à l'angle de frottement interne effectif. Cependant, en regardant les valeurs de Q_m et B_q obtenues pour le SCPT16-67 (présentées dans l'Annexe 5), il peut être conclu qu'il n'est pas possible d'obtenir l'angle de frottement à l'aide de cette méthode. Effectivement, les valeurs de Q_m ne concordent pas avec les courbes B_q associées à l'état *in situ* des résidus. Pour la plupart de la profondeur, la valeur de B_q se retrouve entre 0.1 et 0.3, mais les valeurs de N_m (Q_m) ne sont pas assez grandes pour toucher à ces courbes et obtenir une valeur d'angle de frottement autour de 34° qui est la valeur attendue. Ceci est dû au fait que les résidus sont sous-consolidés et à la mauvaise approximation et compréhension de l'état *in situ* de ces résidus en termes de contraintes effectives et de pressions interstitielles. Encore une fois, une distribution de pression interstitielle hydrostatique a été assumée.

La corrélation de Chen et Juang (1996) s'est avérée applicable pour les résidus miniers normalement consolidés tels que ceux testés en laboratoire. En effet, en appliquant l'équation [2-17] sur les résultats en laboratoire, un angle de frottement interne effectif moyen de 34° est obtenu (voir Tableau A5-3 en Annexe 5), ce qui est semblable à l'angle trouvé à l'aide des essais conventionnels en laboratoire (essai de cisaillement direct), ainsi que celui trouvé par Archambault-Alwin (2017) pour les mêmes résidus. L'angle déterminé à l'aide du cône est similaire à celui trouvé durant l'essai de cisaillement direct car un plan de cisaillement est imposé

sur les résidus dans les deux types d'essais. Ceci explique pourquoi l'angle de frottement interne effectif trouvé avec le CPT n'est pas près de 38.7° , tel que déterminé par Grimard et al. (2017) à l'aide de l'essai triaxial.

À partir de l'équation de Chen et Juang (1996), il est possible de déterminer une ligne théorique de la valeur de la résistance en pointe, si les résidus étaient normalement consolidés, qui aurait un angle de frottement interne effectif de 34° tel qu'obtenu en laboratoire. Cette droite apparaît dans la Figure 5-11 représentant les données du SCPT16-67. Il peut être conclu que les résidus miniers de Canadian Malartic sont, pour la majorité de la profondeur, sous-consolidés ($q_c < q_{c\text{-théorique}}$). Les valeurs de q_c plus grandes que $q_{c\text{-théorique}}$ peuvent être expliquées par l'effet de dessiccation sur les résidus lorsque ceux-ci étaient à la surface, la possibilité qu'une mince couche de glace soit à cette élévation ou tout autre anomalie ponctuelle dans le sol. Il est assumé à partir de cette méthode que les résidus ayant $q_c \geq q_{c\text{-théorique}}$ sont normalement à surconsolidés et que ceux ayant $q_c < q_{c\text{-théorique}}$ sont définis comme étant sous-consolidés. Des figures similaires à la Figure 5-11 représentant les lectures de q_c et la droite théorique des CPTu et SCPTu de 2013 et 2016 sont présentées en Annexe 6 et 7 respectivement.

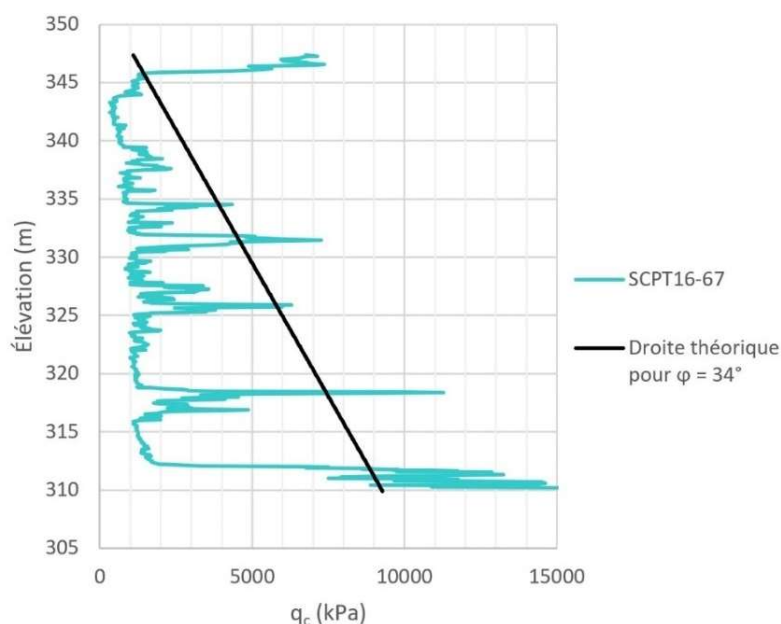


Figure 5-11 : Résistance en pointe du cône et droite théorique basée sur Chen et Juang (1996)

5.3.7 Module de cisaillement

Le module de cisaillement est généralement calculé à partir des lectures de V_s et la masse volumique ρ . Lorsque des lectures de V_s ne sont pas disponibles, les méthodes de Robertson et Campanella (1986) et Mayne (2007) présentées dans le Chapitre 2 peuvent être employées pour les sols naturels. Pour simplifier les calculs, la relation linéaire déterminée par James (2009) pour q_c plus petit que 5 000 kPa est employée pour représenter la méthode de Robertson et Campanella (1986). La Figure 5-12 combine les corrélations de Mayne (2007) et James (2009) appliquées aux résultats de laboratoire de simulation d'essais CPT et les comparent aux données en laboratoire obtenues et présentées par Grimard et al. (2017) sur la consolidation des résidus avec lectures de V_s . L'équation de Mayne (2007) a été utilisée avec l'exposant $m=0.6$ (pour les sables) et $m=0.8$ (pour les silts) pour déterminer ce qui est plus près des valeurs de G_{max} pour les résidus miniers. De plus, une moyenne des résultats obtenus sur un mètre de profondeur a été calculée pour limiter l'impact des pics provenant des lectures de q_c .

Il peut être remarqué sur la Figure 5-12 que les résultats moyens obtenus avec l'équation de Mayne pour les silts sont les plus proches de ceux obtenus par Grimard et al. (2017) avec le V_s . Cependant, il peut être remarqué que les courbures de ces deux relations ne concordent pas indiquant qu'une calibration de l'équation de Mayne (2007) est nécessaire. En observant la Figure 5-13, il peut être remarqué que les valeurs de G_{max} obtenues avec les équations de James (2009) et Mayne (2007) sont semblables à celles trouvées grâce aux lectures de V_s aux élévations où des couches de résidus normalement consolidées se trouvent. Cependant, ces équations ne sont pas applicables aux résidus sous-consolidés car, tel qu'indiqué sur la Figure 5-13, elles sous-estiment les valeurs de G_{max} à ces élévations. Il peut donc être conclu à partir de ces deux figures qu'une calibration de la corrélation de Mayne (2007) pour les silts (présentée dans la section 2.3.2.7) est nécessaire pour obtenir le G_{max} si des lectures de V_s ne sont pas disponibles.

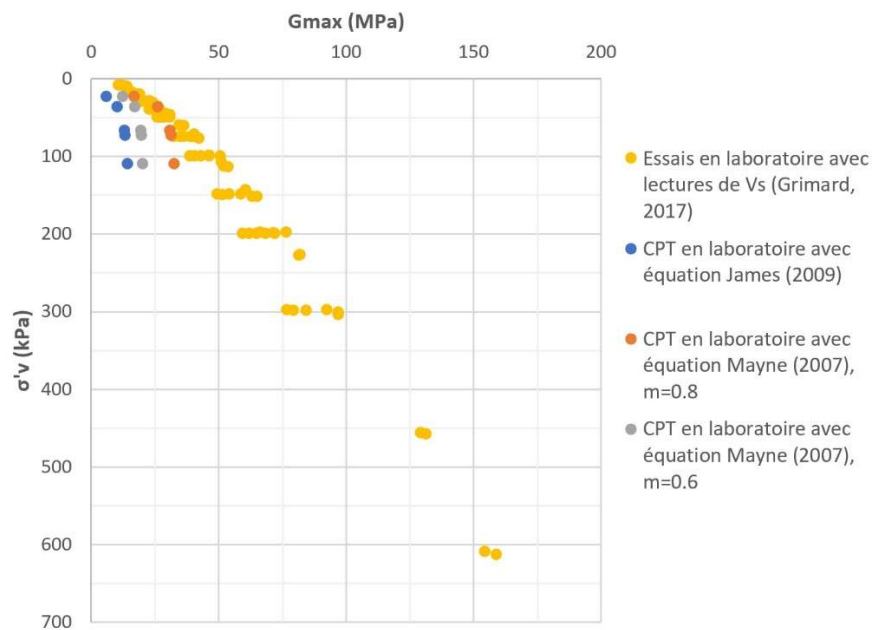


Figure 5-12 : Modules de cisaillement obtenus à partir de q_c et V_s pour les résidus en laboratoire

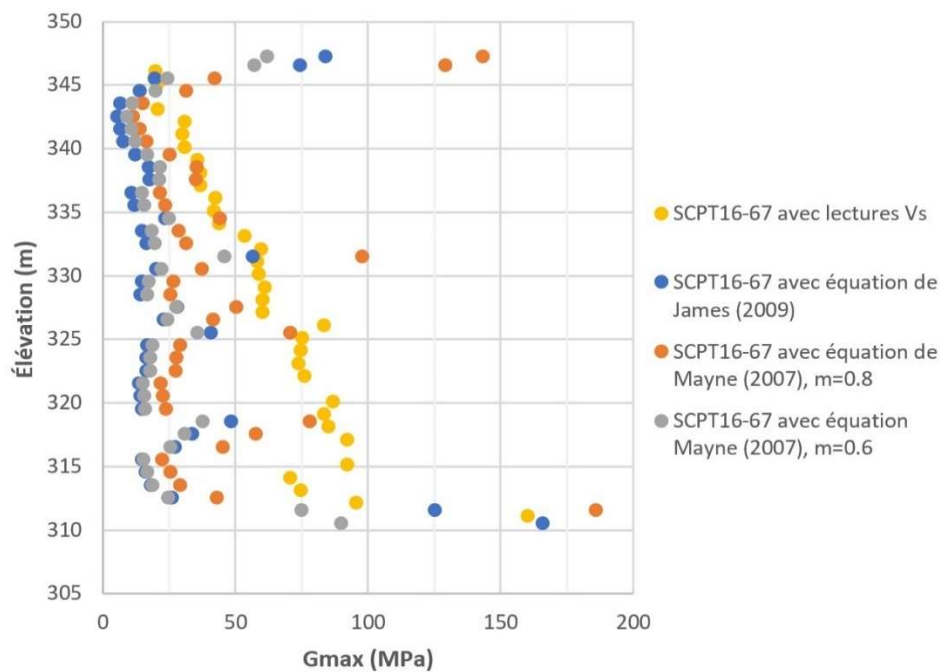


Figure 5-13 : Valeurs de G_{max} pour le SCPT16-67 obtenues avec les différentes méthodes pour les résidus de l'essai SCPT16-67

5.3.8 Indice N de l'essai SPT

À partir de la corrélation de Davies (1999) reliant le ratio q_c/N à l'indice des matériaux I_c , il est possible d'obtenir le coefficient nécessaire pour obtenir une valeur de N -SPT approximative à partir de la résistance en pointe. En utilisant le I_c moyen (moyenne calculée pour des couches d'un mètre) du SCPT16-67, un ratio q_c/N variant entre 0.3 et 0.5 est obtenu avec un q_c exprimé en MPa. Pour pouvoir le comparer au ratio de Ulrich et Hughes (1994), q_c doit être exprimé en bars. À la suite de la conversion, le ratio obtenu avec la relation de Davies (1999) se trouve entre 3 et 5 avec q_c exprimé en bars. Basé sur Ulrich et Hughes (1994), le ratio pour des résidus miniers devrait se trouver entre 5 et 6. Cette discordance vient du fait que la relation de Davies (1999) est basée sur une base de données de CPT effectués sur des vieux résidus consolidés ayant un I_c constant sur toute leur profondeur. De plus, la relation de Davies (1999) est basée sur les corrélations de Seed et De Alba (1986) et Robertson, Campanella et Wightman (1983), qui indiquent que le D_{50} a un impact sur le ratio q_c/N (Davies, 1999). Dans l'article de Ulrich et Hughes (1994), les auteurs critiquent ces corrélations en indiquant que le D_{50} n'a en fait aucun impact sur le ratio q_c/N .

À partir de forages réalisés par le passé, il est connu que les valeurs de N -SPT dans le parc à résidus de la mine Canadian Malartic sont entre 0 et 6 (Golder, 2014). En utilisant le ratio trouvé avec la corrélation de Davies (1999), des valeurs de N variant généralement entre 1 et 10 sont obtenues. En utilisant un ratio de 6 tel que recommandé par Ulrich et Hughes, des valeurs de N variant entre 0.7 et 7.5 sont obtenues. À partir de ces données, il peut être conclu qu'un ratio de q_c/N de 6 est préférable pour convertir la résistance en pointe du cône en nombre de coups N de l'essai SPT.

5.3.9 Vitesse des ondes de cisaillement

La vitesse des ondes de cisaillement normalisée, V_{sl} , peut être calculée à partir des mesures de V_s de terrain, comme l'indique l'équation [2-24], en assumant que les pressions interstitielles sont hydrostatiques. Ces valeurs peuvent ensuite être comparées à celles obtenues avec la corrélation de Karray et Hussien (2017) et ainsi valider l'applicabilité de cette dernière pour les résidus miniers. Les valeurs de V_{sl} obtenues avec la corrélation trouvée par Karray et Hussien (2017) (équation [2-22] avec $D_{50} = 0.025$ mm) sont similaires aux V_{sl} calculées avec l'équation [2-24]

tel qu'illustré sur la Figure 5-14. Des différences peuvent être remarquées aux élévations où il y a des pics dans les lectures de q_t qui sont causés par des anomalies dans le sol tel que des lentilles de glace ou des couches de résidus desséchés. L'hypothèse que la pression interstitielle est hydrostatique reste à confirmer pour conclure si la corrélation de Karray et Hussien (2017) peut être appliquée sur les résidus miniers de la mine Canadian Malartic.

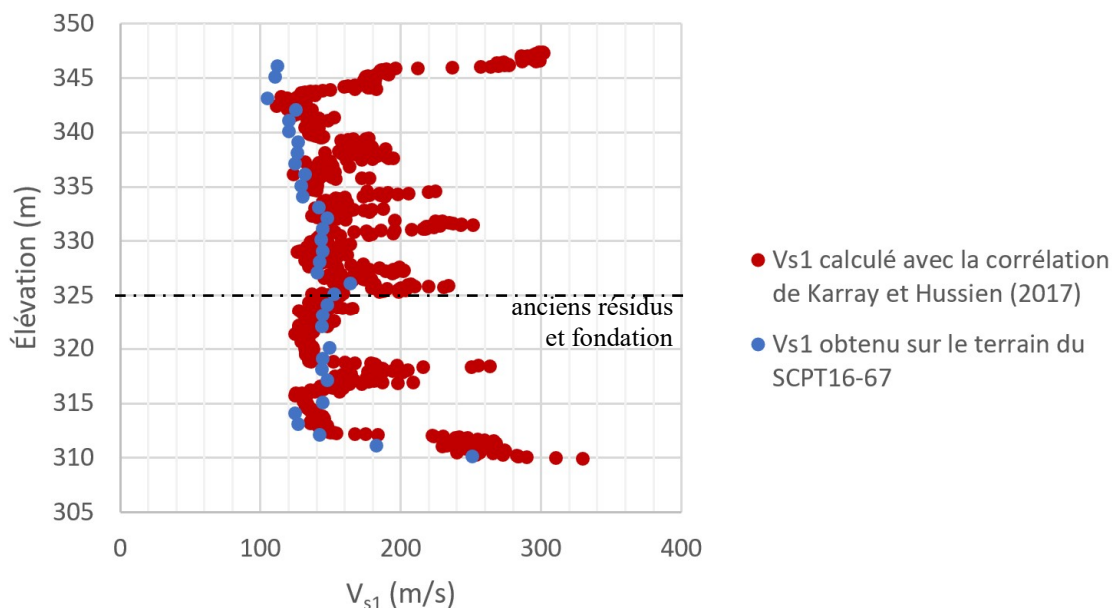


Figure 5-14 : Comparaison des V_{s1} et V_s obtenus sur le terrain et avec la corrélation de Karray et Hussien (2017)

De plus, il peut être remarqué que la valeur calculée de la variable Y ($Y = V_{s1}/(Q_m/10)^{0.25}$), tel que défini par Karray et Hussien (2017), est de 171, qui est comprise dans la zone des valeurs typiques pour les silts naturels non plastiques (de 157 à 184 pour $D_{50} = 0.025$ mm) identifiée en gris sur la Figure 2-17. Cependant, les valeurs du ratio $V_{s1}/(q_{tIN})^{0.411}$ ne suivent pas la même tendance que l'intervalle typique montré en gris de la Figure 2-18, tel qu'illustré sur la Figure 5-15. Un des facteurs causant cette discordance dans les valeurs est la grande variation du I_c sur la profondeur de l'essai et l'hypothèse que la pression interstitielle est hydrostatique ce qui affecte les valeurs de σ'_{vo} assumées. Une réévaluation des relations de Karray et Hussien (2017) est donc recommandée lorsque les conditions *in situ* sont déterminées (voir section 5.5.4).

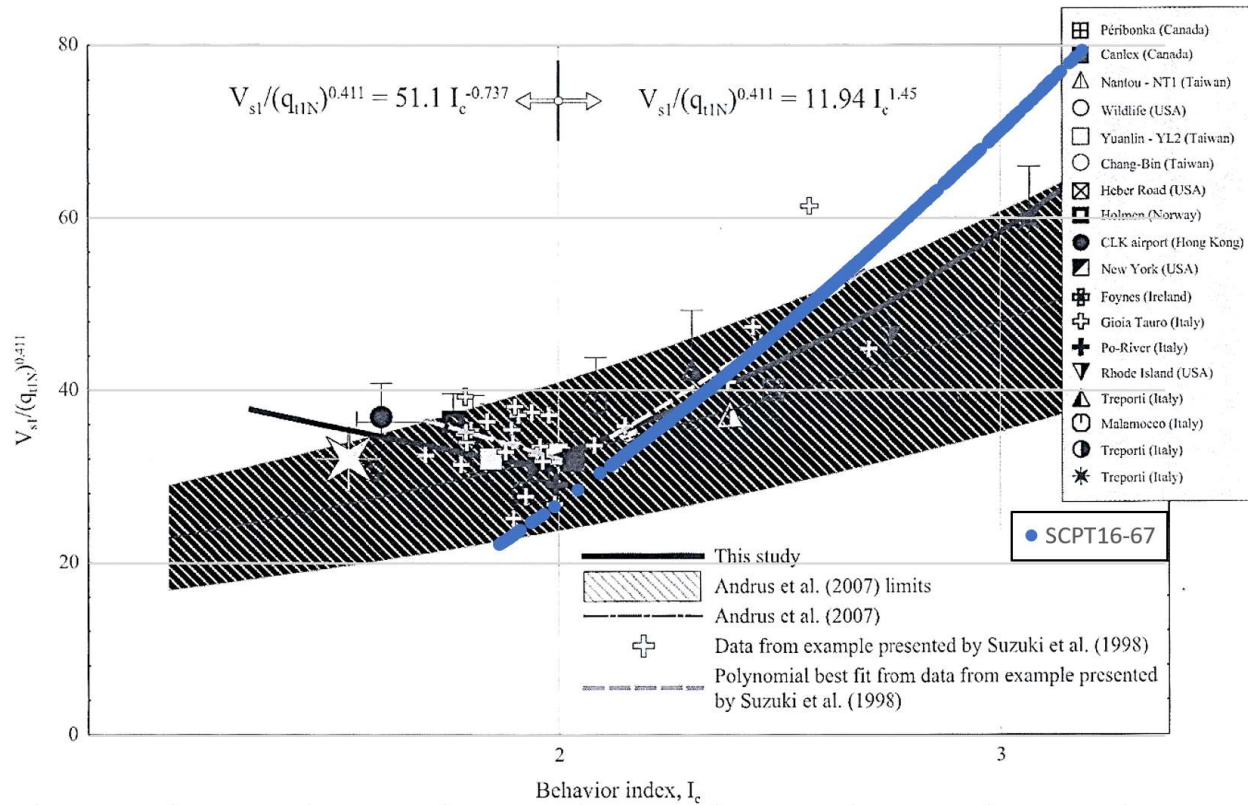


Figure 5-15 : Valeurs obtenues avec la corrélation entre V_{sl} , q_{t1N} et I_c du SCPT17-67

5.4 Caractérisation des conditions *in situ* avec la relation de Chen et Juang (1996)

Tel que mentionné dans la section 5.3.6, la corrélation de Chen et Juang (1996) permet d'obtenir l'angle de frottement interne effectif à partir des essais CPT. Il est également possible de manipuler l'équation [2-17] pour déterminer une droite théorique indiquant q_c pour ϕ' égal à 34° et les contraintes effectives sont calculées en assumant une pression interstitielle hydrostatique. Le croisement de cette droite théorique avec les lectures de q_c du CPT signifie que les résidus situés à ces élévations sont normalement consolidés ($q_c = q_{c\text{-théorique}}$, $u_{in situ} = u_0$) ou surconsolidés ($q_c \geq q_{c\text{-théorique}}$, $u_{in situ} < u_0$). L'état surconsolidé des résidus peut être expliqué par le fait que ces couches ont probablement été à la surface pendant une période de temps prolongée par le passé ce qui a conduit à un assèchement et une densification locale des résidus. Également, il est possible qu'une anomalie telle que des lentilles de glace cause les valeurs de q_c calculées avec la relation Chen et Juang (1996) d'être plus grandes que $q_{c\text{-théorique}}$. Des lentilles de glace ainsi

que des résidus gelés ont été remarquées en 2013 dans le parc à résidus de Canadian Malartic et la valeur de q_c de ceux-ci étaient considérablement plus grande que q_c des résidus (Golder, 2014)

À partir de l'équation [2-17] de Chen et Juang (1996), il est également possible d'isoler σ'_v et ainsi déterminer les contraintes effectives *in situ* à partir des lectures de q_c de terrain et l'angle de frottement interne effectif connu. La Figure 5-16 montre la distribution des contraintes effectives *in situ* déterminée à l'aide de la relation de Chen et Juang (1996) pour le SCPT16-67. Il peut être remarqué que cette distribution est loin d'être linéaire et que les contraintes effectives *in situ* sont égales ou supérieures aux contraintes effectives assumées (avec u hydrostatique) à quelques élévations seulement. Ceci est la confirmation que les résidus miniers de Canadian Malartic sont sous-consolidés ($u_{in situ} > u_0$) lorsqu'ils sont déposés loin des inclusions et des digues. L'influence des stériles à la surface des résidus permettant l'installation de la machine de ConeTec peut être remarquée dans les premiers mètres de l'essai CPT où q_c est largement supérieurs aux lectures obtenues aux autres profondeurs. Les élévations en dessous de 325 m ont été ignorées car il est connu que d'anciens résidus ainsi que la fondation en sols naturels s'y trouvent. Des figures similaires à la Figure 5-16 pour les contraintes effectives *in situ* des CPTu et SCPTu de 2013 et 2016 sont présentées en Annexe 10 et 11 respectivement.

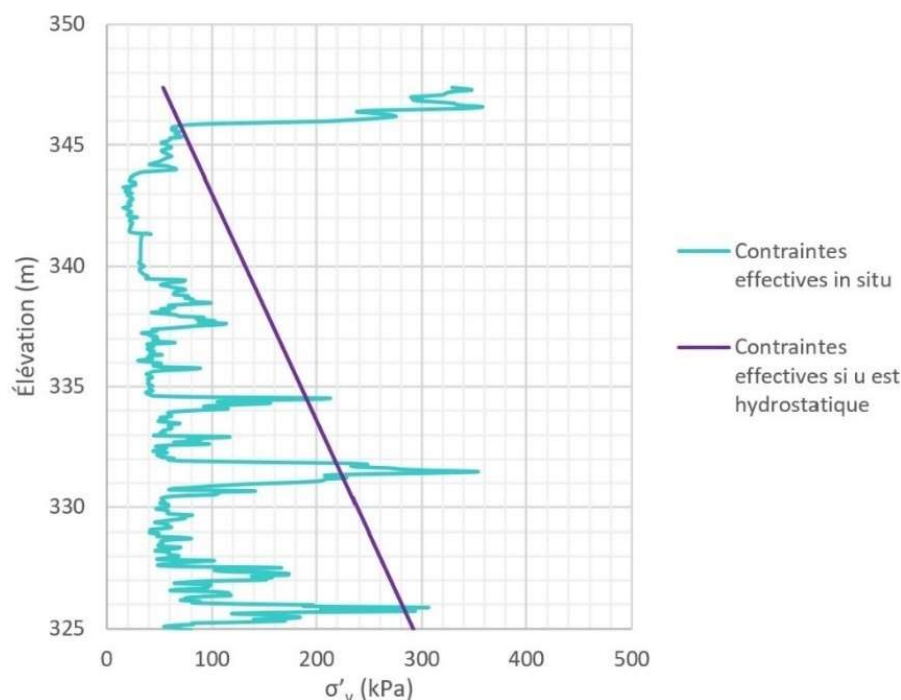


Figure 5-16 : Contraintes effectives *in situ* du SCPT16-67 comparées aux contraintes assumées

Un graphique indiquant la distribution de la pression interstitielle *in situ* comparée à la pression détectée par le cône ainsi que la pression hydrostatique est présenté sur la Figure 5-17. Il peut être remarqué que la pression interstitielle *in situ* est considérablement plus grande que celle hydrostatique sur la majorité de la profondeur de l'essai ce qui confirme que les résidus sont sous-consolidés. Cette figure donne aussi une indication de l'excès de pression interstitielle causée par la pénétration du cône qui est la différence entre u détecté par le cône (en gris) et u *in situ* du SCPT16-67 (en turquoise). Cette différence s'accroît sous l'élévation 325 m où d'anciens dépôts de résidus ainsi qu'une couche d'argile se trouvent. Malgré que l'angle de frottement interne effectif de la fondation n'est probablement pas de 34° ce qui peut fausser le calcul de u *in situ* sous l'élévation 325 m, cette observation est en accord avec la littérature. En effet, il a été déterminé que dans les sols moins perméables, tels que de l'argile, une plus grande génération de pressions interstitielles en excès est observée (Chai et al., 2016). Des figures similaires à la Figure 5-17 représentant les pressions interstitielles *in situ* des CPTu et SCPTu de 2013 et 2016 sont présentées en Annexe 10 et 11 respectivement.

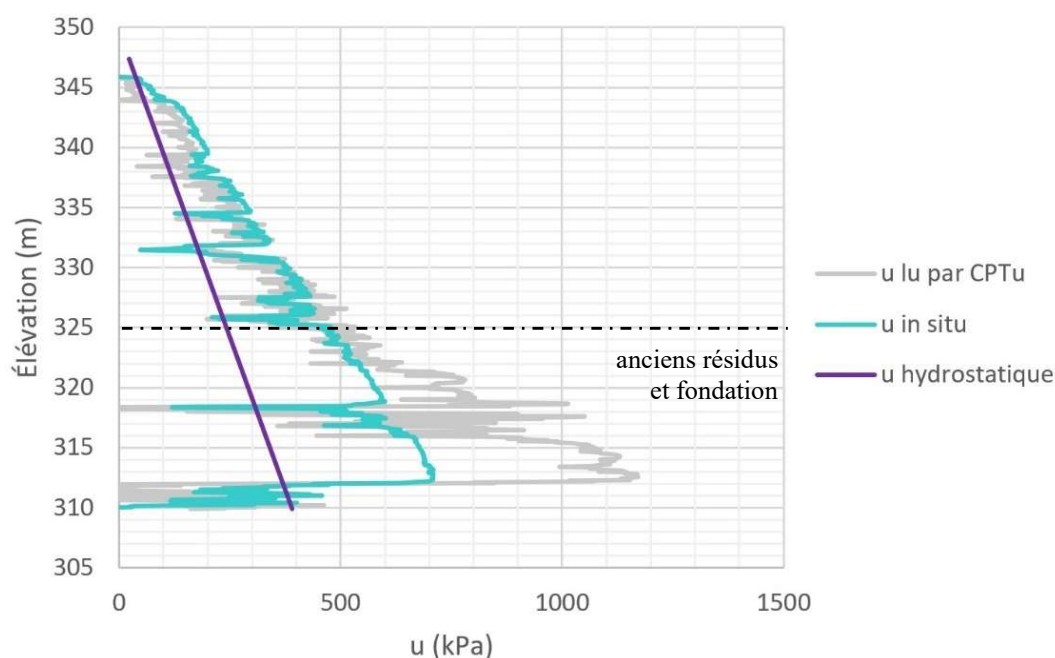


Figure 5-17 : Distribution des pressions interstitielles du SCPT16-67 comparée à la pression hydrostatique et la pression mesurée par le cône

Il peut être observé sur la Figure 5-18 et la Figure 5-19 que les résidus à l'emplacement du SCPT16-71 sont, pour la majorité de leur épaisseur, normalement et surconsolidés. Ceci peut être

déterminé en comparant la droite des contraintes effectives si u est hydrostatique (en mauve) à la courbe de valeurs de $\sigma'_{in situ}$ (en rouge) sur la Figure 5-18 ainsi qu'en comparant $u_{in situ}$ (en rouge) avec u_0 (en mauve) sur la Figure 5-19.

Dans les deux figures, une anomalie est remarquée entre les élévations 331 à 333 m où des valeurs de σ'_v sont beaucoup plus grandes. Cette anomalie est également présente dans les mesures de q_c aux mêmes élévations. Elle indique que cette couche de résidus a probablement été sujette à la dessiccation lorsqu'elle était à la surface. Davies (1999) indique que des pressions interstitielles négatives causées par le cycle de saturation-désaturation tend à surconsolider les résidus miniers de granulométrie fine ce qui peut expliquer que cette couche de résidus est très résistante. De plus, il est probable que ces résidus soient gelés ce qui affecte les lectures de q_c à la hausse. Il est donc normal que la corrélation de Chen et Juang (1996) n'estime pas avec précision les valeurs des contraintes effectives et des pressions interstitielles *in situ* à ces élévations, car les mesures de q_c sont affectées par des anomalies ponctuelles et non les propriétés des résidus uniquement. Tel que mentionné précédemment, des lentilles de glace ainsi que des couches de résidus glacées ont été remarquées par le passé dans le parc à résidus de Canadian Malartic (Golder, 2014).

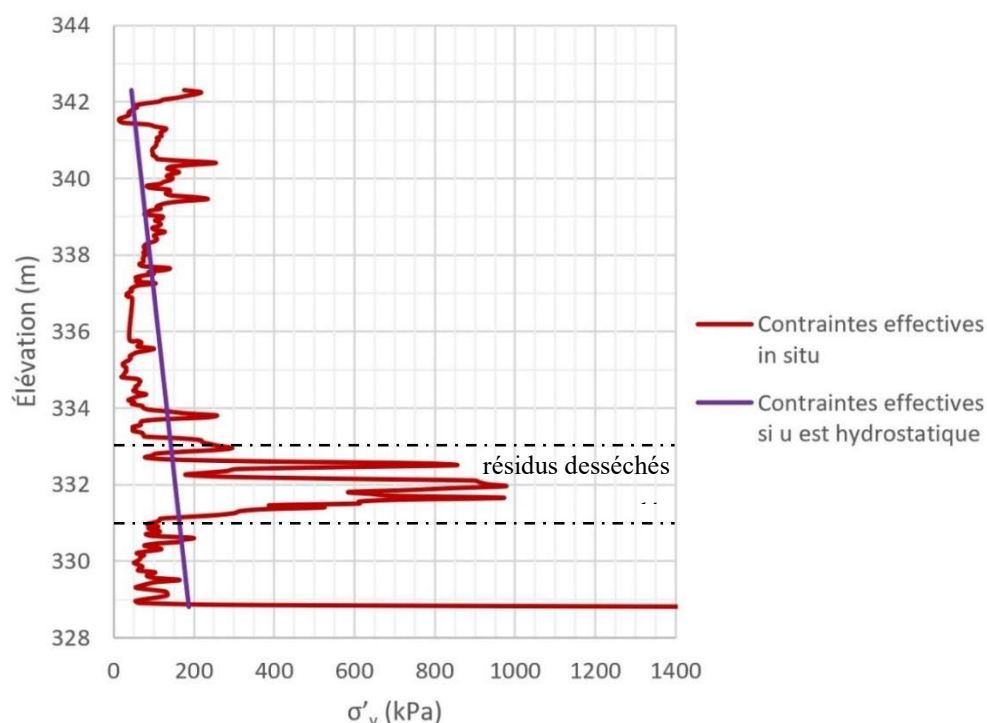


Figure 5-18 : Contraintes effectives in situ SCPT16-71 comparées aux contraintes assumées

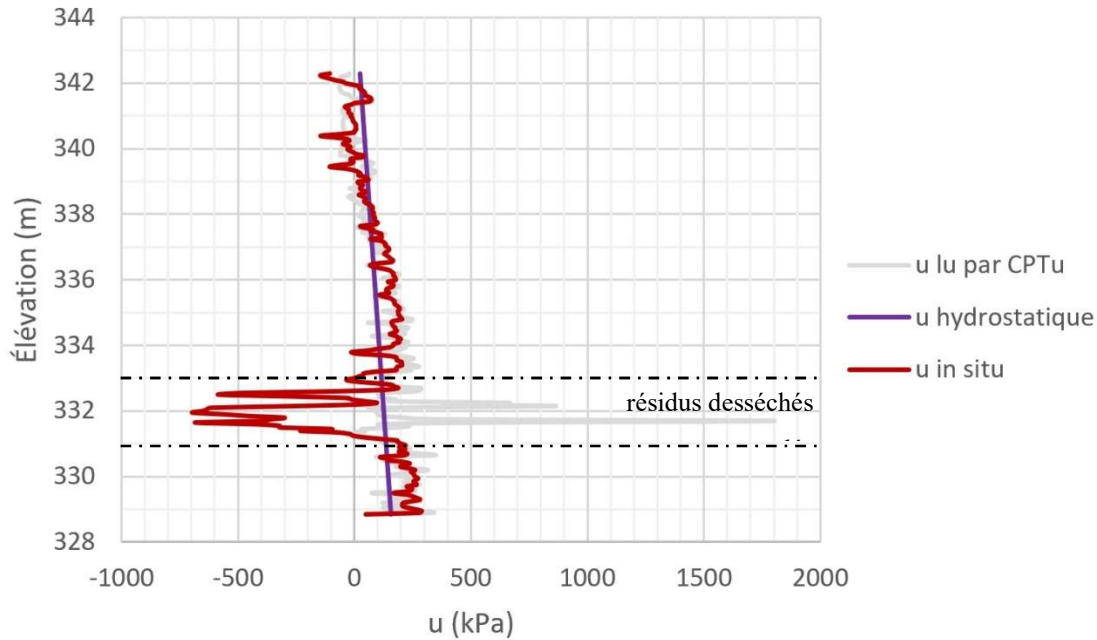


Figure 5-19 : Distribution des pressions interstitielles du SCPT16-71 comparée à la pression hydrostatique et la pression mesurée par le cône

Ces figures donnent une appréciation du degré de consolidation des résidus miniers, mais malheureusement, celui-ci ne peut pas être calculé, car la charge causant l'excès de pression interstitielle n'est pas connue et ne peut pas être estimée. Toutefois, il est possible de décrire leur état à l'aide d'un indice l'état de consolidation des résidus. Cet indice est défini dans ce mémoire comme étant l'indice de consolidation, I_U , qui est sans unité et positif ($I_U \geq 0$). La valeur de I_U peut être calculée comme suit :

$$I_U = 1 - \left(\frac{u_{in situ} - u_0}{u_0} \right) \quad [5-2]$$

où $u_{in situ}$ est la pression interstitielle calculée à partir de la corrélation de Chen et Juang (1996); u_0 est la pression interstitielle hydrostatique.

Si les résidus sont normalement consolidés, la valeur de I_U est de 1 alors que s'ils sont surconsolidés, I_U est plus grand que 1. Toute valeur de I_U plus petite que 1 indique que ces résidus sont sous-consolidés. La Figure 5-20 illustre l'indice de consolidation appliqué au SCPT16-67 qui a des résidus majoritairement sous-consolidés (U.C.). La Figure 5-21 illustre l'application de I_U sur le SCPT16-71 effectué dans des résidus qui sont majoritairement normalement consolidés (N.C.) et surconsolidés (O.C.). Des figures similaires à la Figure 5-20 et

à la Figure 5-21 pour les valeurs de I_U des CPTu et SCPTu de 2013 et 2016 sont présentées en Annexe 8 et 9 respectivement.

Il est intéressant de remarquer la quantité de points où I_U est nul sur la Figure 5-20. Cela indique que la quantité de pression d'eau en excès à ces élévations est aussi grande que la pression interstitielle si les résidus étaient consolidés, donc, que la pression *in situ* est le double de la pression interstitielle. Il peut être remarqué sur la Figure 5-21 que la majorité des points ont une valeur de I_U plus grande que 1 et qu'il y a moins de valeurs nulles que sur la Figure 5-20. Cela indique que les couches de résidus sous-consolidés du SCPT16-71 sont plus près d'atteindre leur état normalement consolidé que celles du SCPT16-67. En d'autres mots, les valeurs de contraintes effectives des résidus du SCPT16-71 sont plus proches des valeurs de σ'_v pour u hydrostatique que celles du SCPT16-67. La présence d'inclusions à proximité du SCPT16-71 est le facteur qui fait en sorte que les résidus à cet emplacement se consolident plus rapidement que les résidus du SCPT16-67. L'influence des inclusions sur la consolidation des résidus miniers est explorée davantage dans le Chapitre 6.

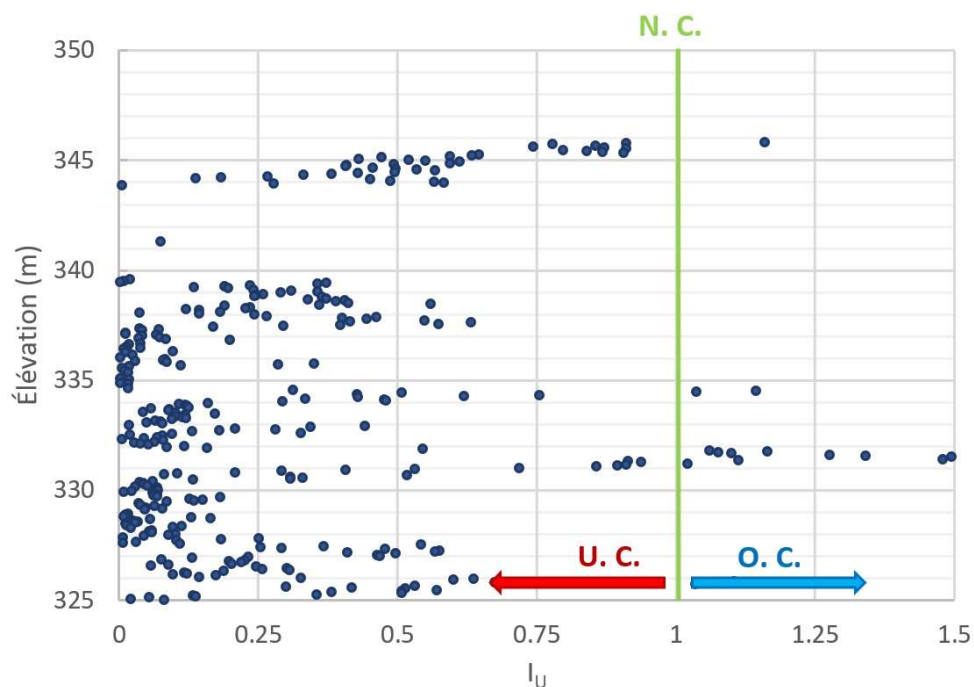


Figure 5-20 : Indice de consolidation I_U appliqué au SCPT16-67

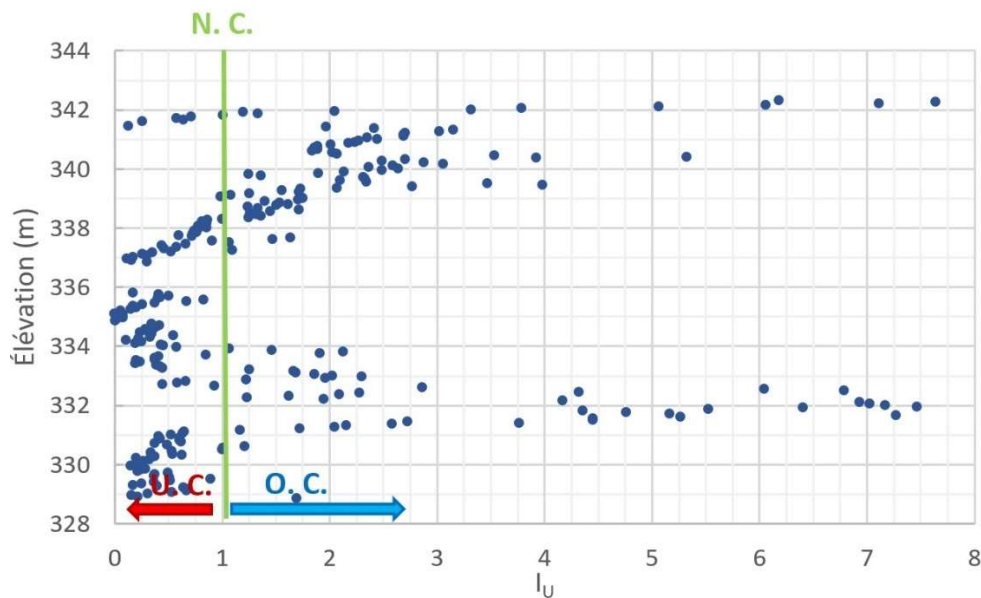


Figure 5-21 : Indice de consolidation I_U appliqué au SCPT16-71

5.5 Calibration des corrélations existantes

À l'aide des contraintes effectives *in situ* déterminées avec la relation Chen et Juang (1996), une calibration des corrélations reliées au poids volumique, au module de cisaillement et à la vitesse des ondes de cisaillement est effectuée et est présentée dans les sections suivantes. Les autres corrélations présentées dans le Chapitre 2 ont prouvées ne pas être applicables pour les résidus de Canadian Malartic même si l'état de contraintes n'étaient pas correctement approximé avec l'hypothèse que u est hydrostatique. En effet, les corrélations en lien avec l'indice de densité et la résistance au cisaillement non drainé n'ont pas été testées de nouveau car leurs résultats ne sont pas affectés par σ'_v et u . Également, la corrélation de Davies (1999) pour déterminer la teneur en fines n'a pas été calibrée car, tel que présenté dans la section 5.3.2, même les résidus normalement consolidés ($u \approx u_0$) ont des teneurs en fines éparpillées qui ne correspondent pas à ce qui est attendu sur le terrain. Ainsi, l'état de contraintes et l'état de consolidation ne sont pas les causes de l'inexactitude de la méthode. Par ailleurs, il n'est pas possible de calibrer cette relation car il n'y a pas de lectures de pressions interstitielles dans la cellule CPT en laboratoire. Aussi, tel que mentionné dans la section 5.3.1, les corrélations en lien avec la classification des sols avec le CPT n'est pas applicable pour les résidus sous-consolidés.

La méthodologie pour calibrer les corrélations ainsi que les corrélations modifiées sont également présentées dans les sections suivantes.

5.5.1 Méthodologie

Les corrélations permettant de déterminer le poids volumique, le module de cisaillement et la vitesse des ondes de cisaillement à partir du CPT sont calibrées à l'aide des résultats CPT de laboratoire et les résultats de terrain des résidus qui sont normalement consolidés. Les contraintes effectives *in situ* déterminées à l'aide de la relation Chen et Juang (1996) ont été utilisées dans ces équations au lieu des contraintes effectives assumées (avec u hydrostatique), car celles-ci sont obtenues directement avec l'angle de frottement interne effectif qui est une propriété connue et la mesure de q_c . En général, la forme de base des équations des différents auteurs a été conservée. Les paramètres de callage des équations ont été ajustés et les équations ont été optimisées en modifiant les valeurs de ces variables pour minimiser l'erreur, E (%), obtenue sur les résultats. En d'autres mots, la somme des écarts, entre les valeurs calculées et les valeurs dites réelles, en valeur absolue a été minimisée. Les résultats de cette optimisation pour chacune des corrélations ainsi que les équations calibrées sont présentés dans les sections 5.5.2 à 5.5.4. À partir de ces corrélations calibrées, il est possible d'obtenir les propriétés des résidus miniers déposés dans le parc à résidus de Canadian Malartic à l'aide du CPT qui sont montrées dans les sections suivantes pour l'essai SCPT16-67.

5.5.2 Poids volumique

La corrélation de Mayne (2007) pour le poids volumique exprimé en fonction de σ'_v et f_s a été calibrée à l'aide des lectures de f_s en laboratoire. Il a été tenté de corréler la deuxième relation de Mayne (2007) basée le V_s à celle basée sur le f_s . Malheureusement, une discordance entre les deux relations a été remarquée, tel qu'illustré sur la Figure 5-22, indiquant que la forme de base de l'équation basée sur le V_s n'est pas correcte. Celle basée sur le f_s a donc été retenue, car sa calibration est directement effectuée sur des résultats en laboratoire en conditions contrôlées.

La formule [2-13] une fois calibrée avec les résultats de laboratoire est présentée dans l'équation [5-3]. L'erreur moyenne calculée pour les résultats CPT en laboratoire est de 0.16%. Cette erreur est obtenue en calculant la différence entre le γ obtenu avec la corrélation calibrée et le γ obtenu en laboratoire à l'aide de l'équation [2-11] divisé par le γ de laboratoire. Il est assumé que cette

corrélation est applicable pour les résidus sous-consolidés, car les contraintes *in situ* ont pu être déterminées et utilisées dans l'équation [5-3]. La Figure 5-22 illustre les valeurs de poids volumique obtenues à partir de cette corrélation calibrée appliquée aux résultats du CPT en laboratoire ainsi qu'aux résultats du SCPT16-67. La Figure 5-23 illustre la variation du γ en fonction de l'élévation à partir de la surface des résidus jusqu'à l'élévation 325 m. La variation du poids volumique en fonction de l'élévation des autres essais de pénétration au cône réalisés en 2013 et 2016 sont présentés dans l'Annexe 8 et 9 respectivement.

$$\gamma = 1.605 \gamma_w (\sigma'_{vo}/\sigma_{atm})^{0.02168} (f_s/\sigma_{atm})^{0.000241} + 5 \quad [5-3]$$

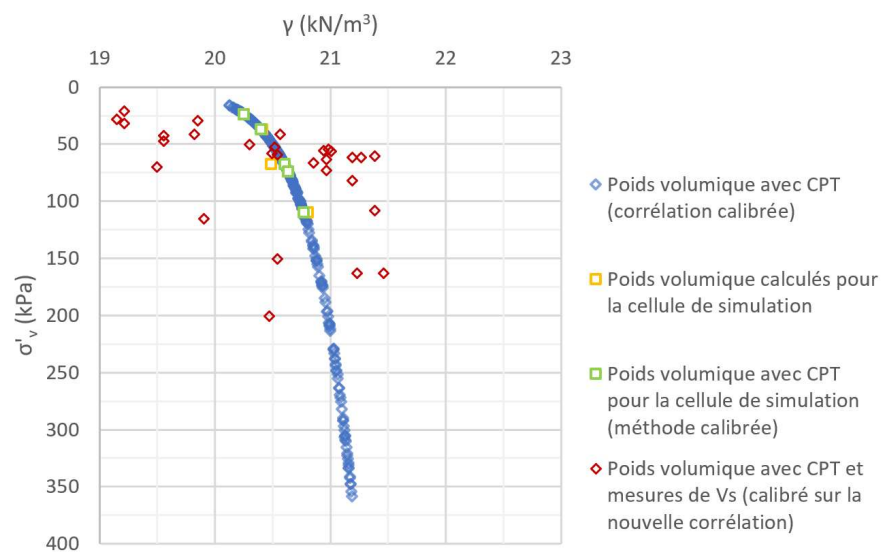


Figure 5-22 : Corrélation calibrée pour estimer $\gamma_{in situ}$ sur la base des données du SCPT16-67

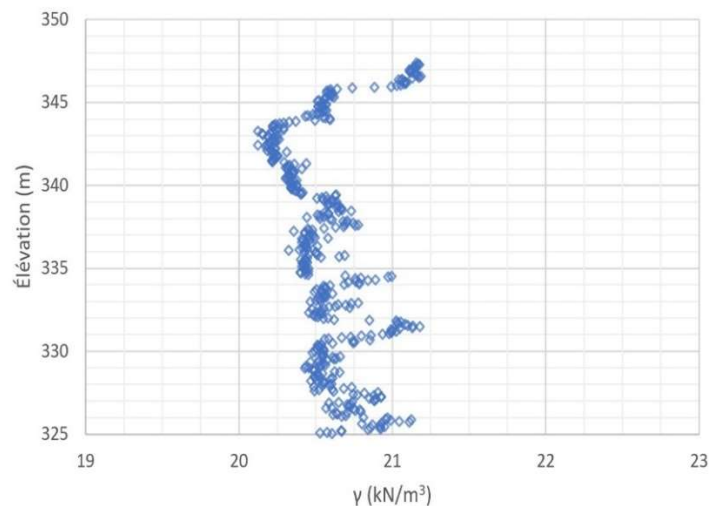


Figure 5-23 : Variation de $\gamma_{in situ}$ en fonction de l'élévation sur la base des données du SCPT16-67

5.5.3 Module de cisaillement

L'équation de Mayne (2007) avec $m=0.8$ a démontré la meilleure représentation de la valeur du G_{max} à partir des lectures de q_c sur le terrain. Cette équation a été appliquée sur les résultats du SCPT16-67 en faisant la moyenne des données pour chaque épaisseur d'un mètre pour pouvoir la calibrer en fonction des G_{max} obtenus à l'aide des lectures de V_s qui sont prises à chaque mètre également. Une fois calibrée, l'équation prend la forme suivante :

$$G_{max} = 40.79 \sigma_{atm} \left[\frac{(q_t - \sigma_{vo})}{\sigma_{atm}} \right]^{0.635} + 19.4 \quad [5-4]$$

À l'aide de cette nouvelle équation, il est possible d'obtenir les valeurs de G_{max} avec une erreur moyenne de 37%. Cette erreur a été calculée avec la différence entre G_{max} obtenu avec cette nouvelle corrélation et G_{max} obtenu avec les lectures de V_s divisée par ce dernier. Il est important de noter que cette erreur est de seulement 20% si les données en dessous de l'élévation 325 m sont ignorées. Tel que mentionné précédemment, une couche d'anciens résidus ainsi que de l'argile se trouvent sous cette élévation et comme les paramètres de callage sont propres aux résidus de Canadian Malartic, l'équation [5-4] n'estime pas correctement les valeurs de G_{max} pour ces autres sols. La Figure 5-24 illustre les valeurs du module de cisaillement obtenues pour le SCPT16-67 à l'aide de la méthode basée sur les lectures de V_s , sur l'équation de Mayne (2007) ainsi que sur l'équation calibrée [5-4]. Des figures similaires illustrant les G_{max} des essais de pénétration au cône effectués en 2013 et 2016 sont présentées respectivement aux Annexes 8 et 9.

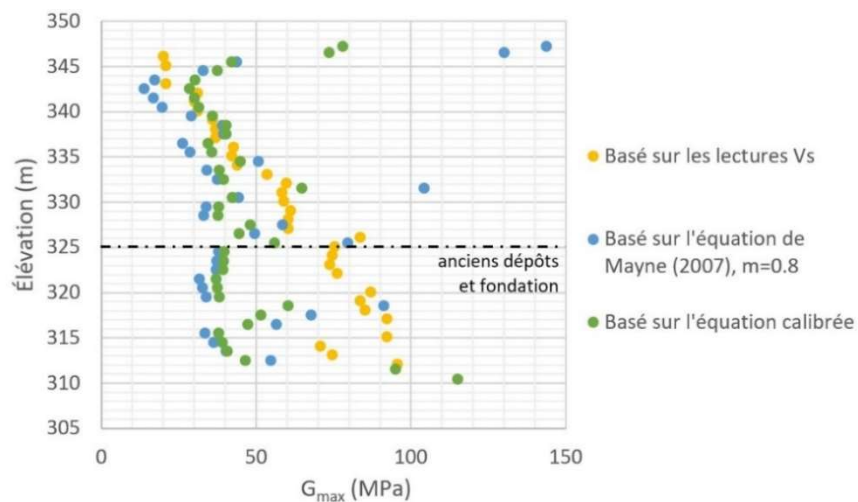


Figure 5-24 : Comparaison des G_{max} obtenus à l'aide des différentes méthodes appliquées sur les données du SCPT16-67

5.5.4 Vitesse des ondes de cisaillement

En utilisant les valeurs du $\sigma'_{in situ}$ obtenues avec la corrélation de Chen et Juang (1996) au lieu de σ'_v (avec u hydrostatique), il est remarqué qu'une calibration de la corrélation de Karray et Hussien (2017) est nécessaire pour que les résultats obtenus concordent avec les lectures de V_s de terrain. En effet, puisque $\sigma'_{in situ}$ est généralement plus petit que σ'_v , cela fait en sorte que les nouvelles valeurs de Q_{tn} et V_{sI} sont plus élevées que celles déterminées précédemment dans la section 5.3.9.

Une moyenne des lectures de q_c sur un mètre de profondeur permet de limiter l'impact des pics des lectures de résistance en pointe et de corréler la valeur moyenne à la lecture de V_s à la même profondeur. Une fois calibrées, les nouvelles équations sont définies comme suit :

$$\frac{V_{sI}}{Q_{tn}^{0.239}} = 1.046/D_{50}^{1.138} + 1 \quad [5-5]$$

$$Q_{tn} = \left(\frac{(q_t - \sigma_{vo})}{\sigma_{atm}} \right) \quad [5-6]$$

Il peut être remarqué que le terme $(\sigma_{atm}/\sigma'_{vo})^{0.5}$ de l'équation initiale [2-23] n'apparaît plus dans la nouvelle équation calibrée [5-6]. Ceci est dû au processus de calibration qui fait en sorte que l'exposant (0.5) devient égal à zéro rendant le terme $(\sigma_{atm}/\sigma'_{vo})$ égal à 1. Donc, une fois calibrée, cette corrélation devient indépendante de la contrainte effective. L'erreur moyenne obtenue sur les données calculées à l'aide des équations [5-5] et [5-6] est de 17.3% et de 12.5% si les résultats sous l'élévation 325 m sont ignorés. Ces erreurs sont calculées avec la différence entre V_{sI} calculée avec ces équations et V_{sI} obtenue sur le terrain divisée par cette dernière. Il est important de noter que les valeurs de V_{sI} ont également été déterminées pour tous les calculs à l'aide des contraintes effectives *in situ* obtenues avec la corrélation de Chen et Juang (1996). La Figure 5-25 illustre les données du V_{sI} à partir des lectures de V_s sur le terrain (SCPT16-67) et celles déterminées avec la corrélation calibrée et non-calibrée. Il peut être remarqué qu'il y a une discordance plus prononcée entre le V_{sI} calculé avec l'équation [5-5] (en vert) et le V_{sI} obtenu à partir du V_s de terrain (en bleu) en dessous de l'élévation 325 m. Encore une fois, il s'agit de la couche où se trouvent d'anciens résidus ainsi que la fondation ce qui affecte les résultats obtenus à l'aide de l'équation empirique. Des figures représentant les valeurs de V_{sI} obtenues pour les autres CPTu et SCPTu de 2013 et 2016 sont présentées en Annexe 8 et 9 respectivement.

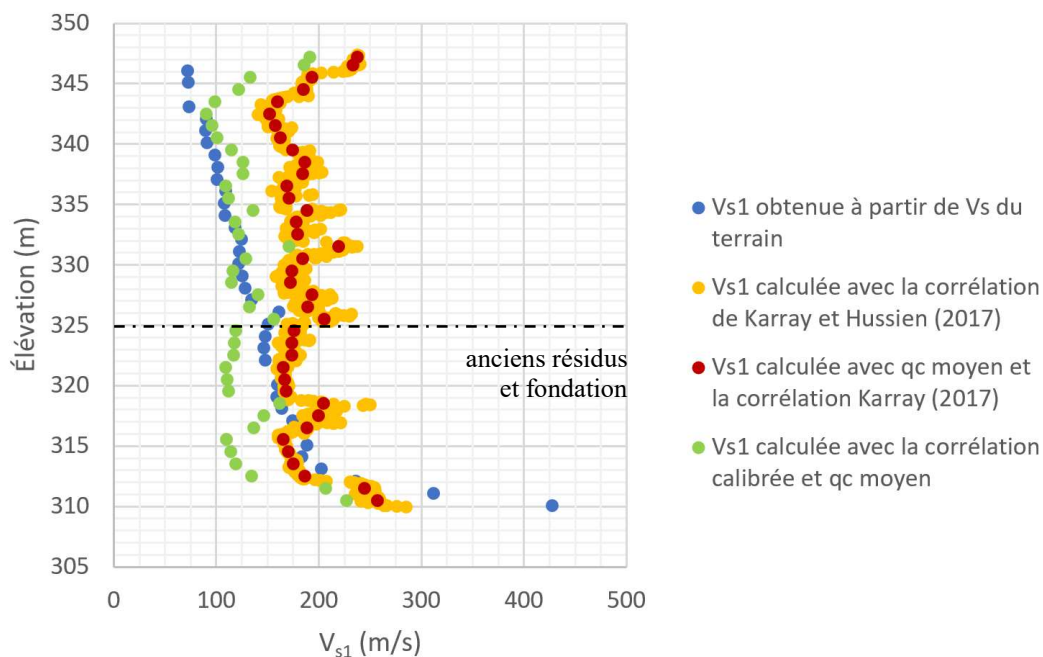


Figure 5-25 : V_{s1} obtenus à partir des données de terrain et de la corrélation calibrée

CHAPITRE 6 ÉVOLUTION DES CONDITIONS *IN SITU*

6.1 Généralités

L'évolution des conditions *in situ* des résidus miniers de la mine Canadian Malartic est étudiée dans ce chapitre. Une comparaison des propriétés et de l'état de contraintes des résidus de deux essais de pénétration au cône est présentée dans la section 6.2 : un essai effectué près d'une inclusion et un essai effectué loin d'une inclusion. Cette comparaison confirme l'effet bénéfique de la proximité de ces ouvrages drainants sur le comportement des résidus miniers. Dans la section 6.3, l'évolution dans le temps des propriétés et de l'état de contraintes des résidus, de 2013 à 2016, est étudiée en comparant trois essais effectués à proximité les uns des autres, deux essais effectués en 2013 et un en 2016.

6.2 Effet des inclusions sur les résidus miniers

L'effet de la proximité des inclusions et des digues sur les résidus miniers du parc à résidus de la mine Canadian Malartic peut être observé dans les différentes lectures obtenues durant les essais SCPTu et CPTu ainsi qu'en comparant les conditions *in situ*, les valeurs du poids volumique, le module de cisaillement et la vitesse des ondes de cisaillement pour ces résidus. Ces comparaisons, entre le SCPT16-67 loin des inclusions et des digues et le SCPT16-71 proche de ces ouvrages, sont présentées dans les sections suivantes. Tel qu'illustré dans la Figure 6-1, le SCPT16-67 a été effectué à une distance d'environ 100 m de la berme la plus proche ce qui correspond à une distance d'environ 200 m de la Digue 5 alors que le SCPT16-71 a été effectué à environ 20 m d'une inclusion (au nord de l'essai) et à environ 100 m de la digue la plus proche (au sud de l'essai). Le sommet des bermes des digues dans le parc à résidus de Canadian Malartic est montré en noir sur la Figure 6-1 (photo datant de 2015). Il est important de noter que d'autres bermes ont été construites vers l'intérieur du parc après 2015 et donc que ces distances ne sont plus exactes en 2017.

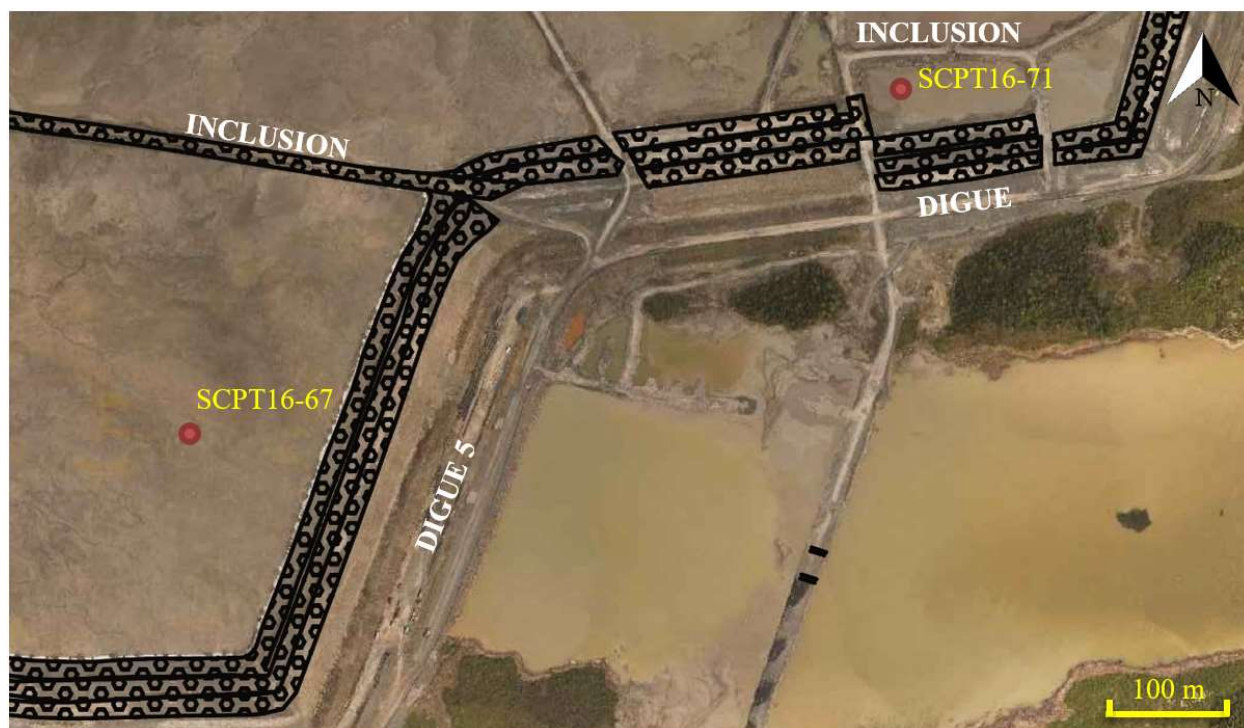


Figure 6-1 : Emplacement des SCPT16-67 et SCPT16-71 par rapport aux digues et inclusions environnantes (photo prise en juin 2015) (modifié de Golder, 2015)

6.2.1 Influence des inclusions sur les essais CPTu et SCPTu

Il a été démontré dans de nombreuses recherches que la co-disposition des stériles et des résidus miniers offre plusieurs avantages tel que, entre autres, un meilleur drainage (dissipation des surpressions) permettant ainsi aux résidus de consolider plus rapidement (Aubertin, 2002; James, 2009; Jaouhar et al., 2011; Bolduc, 2012; Bolduc & Aubertin, 2014; James et al., 2017). L'effet de la proximité des inclusions sur les résidus peut être remarqué sur les données obtenues lors des essais CPTu. En effet, en faisant la comparaison entre les essais de pénétration au cône effectués près de ces inclusions, tel que le SCPT16-71, et les essais effectués à des endroits loin des inclusions d'une cellule du parc tel que le SCPT16-67. En effet, il peut être remarqué, tel que sur la Figure 6-2 (a), que la résistance en pointe est généralement plus grande et est plus proche de la droite théorique obtenue avec la formule de Chen et Juang (1996) pour les essais CPTu/SCPTu près des inclusions. Aussi, la pression interstitielle mesurée par la sonde suit la droite de la pression hydrostatique dans les CPTu/SCPTu près des inclusions et des digues contrairement à celle mesurée lors des essais plus éloignés de ces ouvrages. Ceci peut être observé sur la Figure

6-2 (b). Ces observations sont une indication qu'effectivement, les résidus proches des inclusions ont une dissipation plus rapide des pressions interstitielles et par conséquent ils gagnent en rigidité.

Il a été remarqué que le frottement sur le manchon ne donne pas d'indication sur l'état de consolidation des résidus (voir Figure 6-3). En effet, celui-ci varie généralement entre 10 et 20 kPa avec des pics qui montent jusqu'à 60 kPa, sans être influencé par la proximité des inclusions ou des digues. Ce résultat était anticipé car le frottement sur le manchon est généralement dépendant de la grosseur des particules et de la cohésion qui ne varient pas avec la profondeur dans le cas des résidus du parc à résidus miniers de la mine Canadian Malartic.

Des observations similaires à celles concernant le SCPT16-71 près des inclusions peuvent être faites pour les SCPT16-68, SCPT16-70, CPT16-72 et CPT16-73 ainsi que CPT13-02 et CPT13-03 (voir Annexe 6 et 7) indiquant que les résidus à ces emplacements sont également influencés par les digues et les inclusions à proximité. Les SCPT16-66, CPT13-01, CPT13-05 et CPT13-06 dénotent avoir un état de consolidation similaire au SCPT16-67 avec un q_c généralement plus faible que la droite théorique et un u plus important.

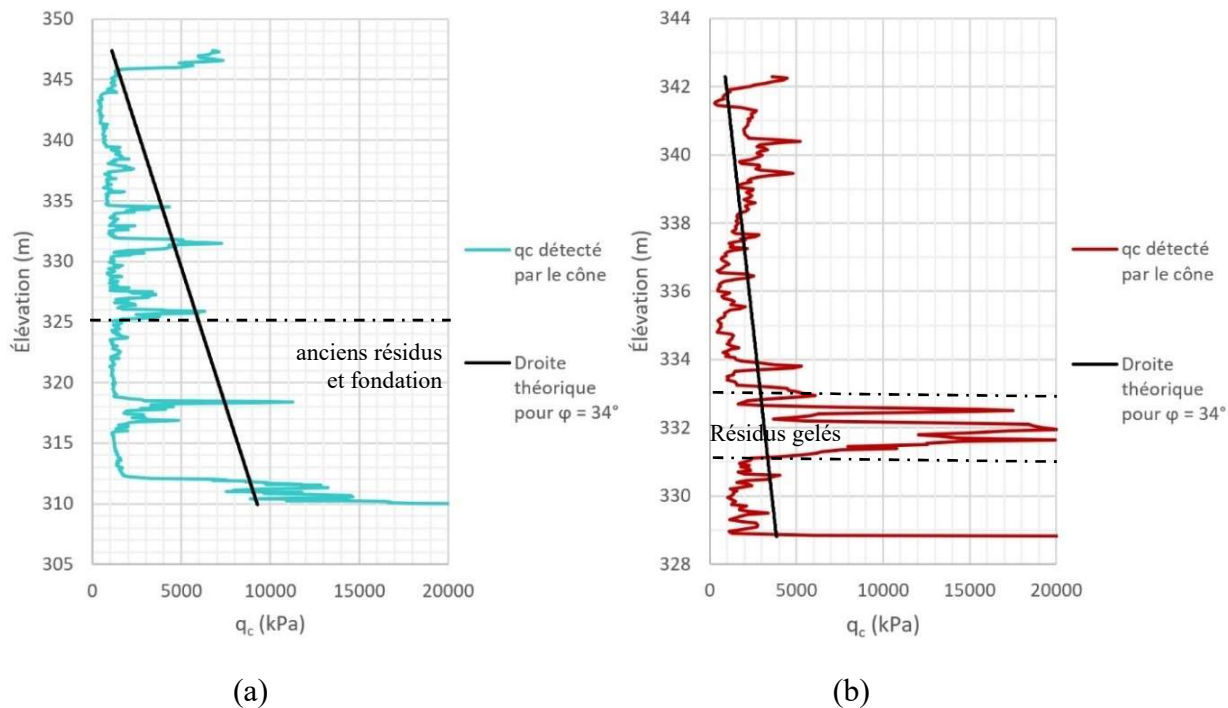


Figure 6-2 : Comparaison des résistances en pointe (a) du SCPT16-67 (loin des inclusions);
(b) du SCPT16-71 (près des inclusions)

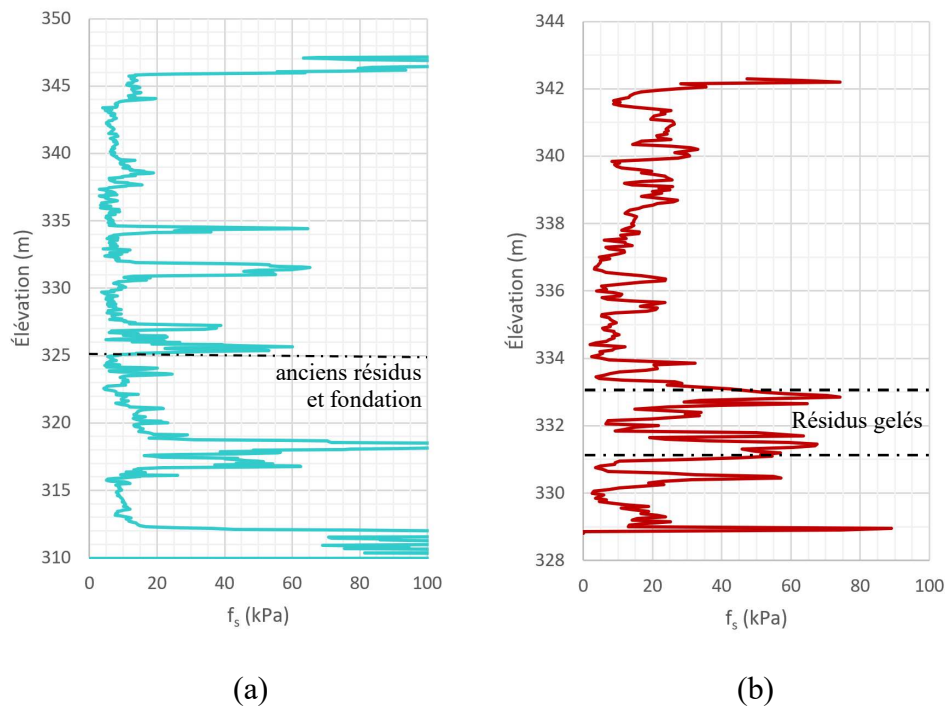


Figure 6-3 : Comparaison du frottement sur le manchon (a) du SCPT16-67 (loin des inclusions);
(b) du SCPT16-71 (près des inclusions)

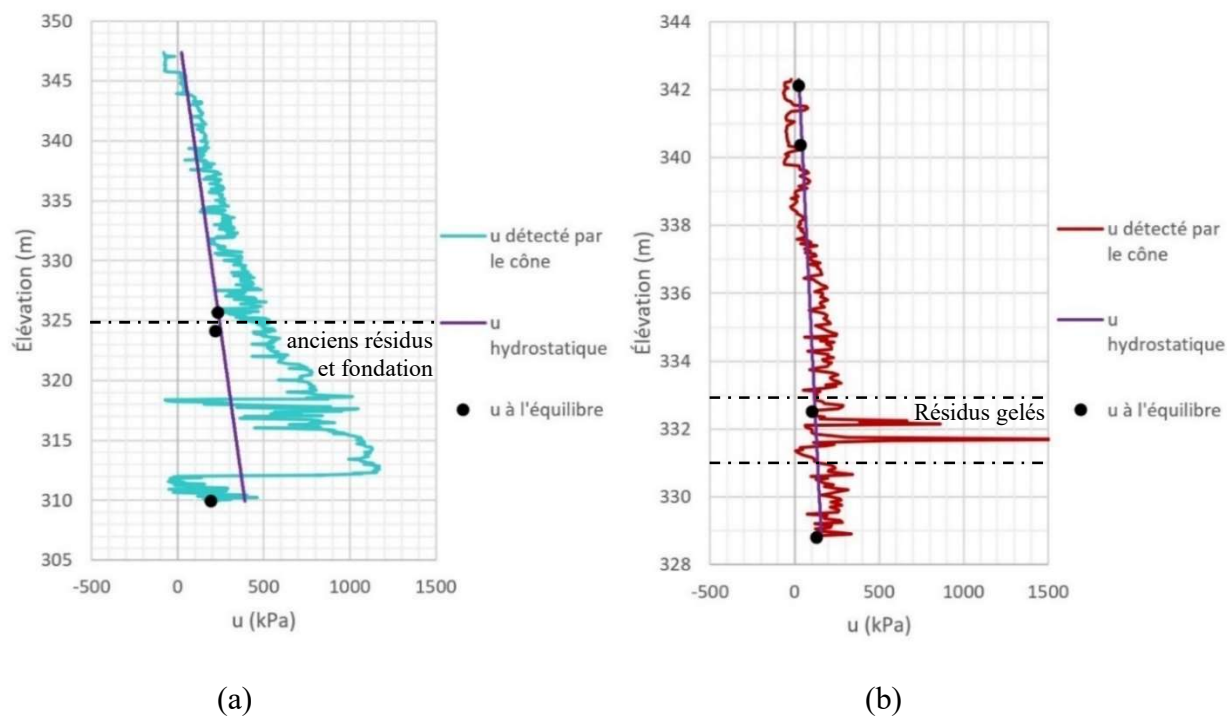


Figure 6-4 : Comparaison des pressions interstitielles (a) du SCPT16-67 (loin des inclusions);
(b) du SCPT16-71 (près des inclusions)

6.2.2 Influence des inclusions sur les conditions *in situ*

Tel qu'illustré sur les Figures 5-16 et 5-18 de la section 5.4, les contraintes effectives *in situ* des résidus obtenues avec la relation de Chen et Juang (1996) sont également affectées par la proximité des inclusions et des digues. Il peut être remarqué que les résidus du SCPT16-67 sont généralement soumis à des contraintes effectives variant entre 20 et 80 kPa, alors que les résidus du SCPT16-71 ont des contraintes effectives variant entre 50 et 125 kPa. Cette différence prouve que les inclusions permettent aux surpressions des résidus près de ces ouvrages (SCPT16-71) de se dissiper plus rapidement grâce au drainage amélioré.

La même conclusion peut être tirée en observant les Figure 5-17 et 5-19 de la section 5.4 illustrant la pression interstitielle *in situ* en comparaison avec la pression hydrostatique et la pression mesurée par la sonde pour les SCPT16-67 et SCPT16-71. En effet, la pression interstitielle *in situ* des résidus du SCPT16-67 atteint le double de la valeur de la pression hydrostatique, ce qui correspond à une pression interstitielle en excès considérable de plus de 200 kPa rendant les résidus à cet emplacement sous-consolidés. Les résidus du SCPT16-71 ont une pression interstitielle en excès de maximum 100 kPa et la courbe de pressions interstitielles *in situ* croise la droite hydrostatique à de nombreuses élévations indiquant que les résidus sont généralement normalement consolidés ($u_{in situ} \approx u_0$).

6.2.3 Influence des inclusions sur le poids volumique

La proximité des inclusions n'a pas une grande influence qui peut être remarquée sur le poids volumique des résidus miniers. Les poids volumiques des résidus du SCPT16-71 sont légèrement plus grands que ceux du SCPT16-67 tel qu'illustré dans la Figure 6-5. Cette influence est légère, car les résidus ont un poids volumique qui ne varie pas beaucoup lorsqu'ils sont soumis à de petites et à de grandes contraintes. Effectivement, tel que remarqué dans l'essai CPT de laboratoire, γ_{sat} varie entre 20.25 et 20.80 kN/m³ pour des contraintes allant de 20 à 110 kPa. De plus, l'indice des vides à la contrainte de 110 kPa était près de la valeur de e_{min} déterminée pour ces résidus indiquant que le γ_{sat} ne devrait pas atteindre une valeur *in situ* beaucoup plus grande que 20.80 kN/m³. Tel que mentionné précédemment, une anomalie est présente dans les résultats du SCPT16-71 entre les élévations entre 331 et 333 m. Celle-ci fait en sorte que le γ est plus grand que la valeur anticipée.

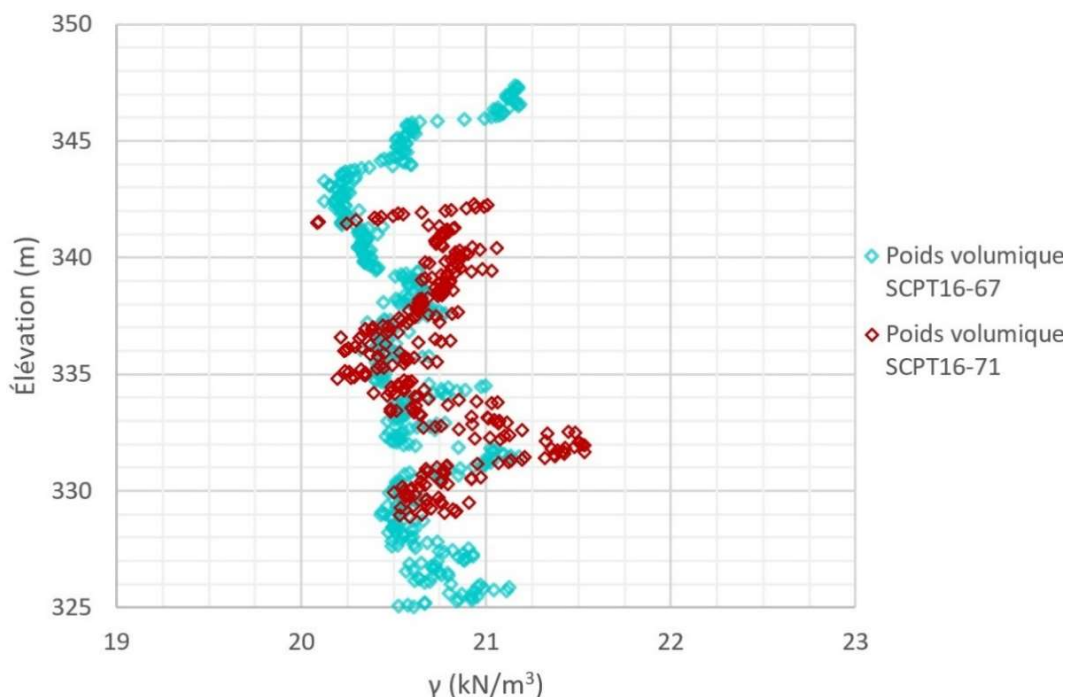


Figure 6-5 : Comparaison du poids volumique obtenu pour les résidus du SCPT16-67 et SCPT16-71

6.2.4 Influence des inclusions sur le module de cisaillement

Les valeurs de G_{max} obtenues pour le SCPT16-67 et SCPT16-71 sont similaires, mais une influence du degré de consolidation des résidus peut être remarquée. Effectivement, les résidus testés lors du SCPT16-71 (plus près des inclusions) démontrent avoir un G_{max} légèrement plus grand que celui des résidus du SCPT16-67. Cette différence est d'environ 10 MPa. Il peut être remarqué qu'aux élévations où les résidus du SCPT16-67 sont normalement ou surconsolidés, par exemple l'élévation 334 m, les valeurs de G_{max} sont presque égales à celles obtenues avec le SCPT16-71.

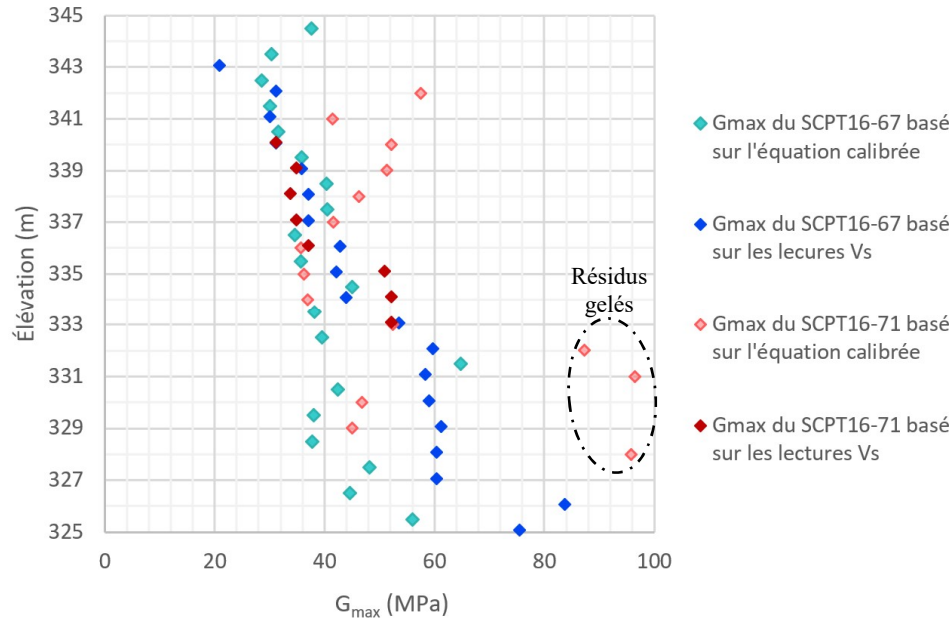


Figure 6-6 : Comparaison des G_{max} obtenus pour les résidus du SCPT16-67 et SCPT16-71

6.2.5 Influence des inclusions sur la vitesse des ondes de cisaillement

Il peut être remarqué sur la Figure 6-7 (a) que la vitesse des ondes de cisaillement normalisée, V_{sl} obtenue à partir du V_s mesurée par le cône sismique est légèrement plus importante pour le SCPT16-71 que le SCPT16-67. Cette observation est vraie pour tous les autres SCPTu effectués en 2016 près d'inclusions ou de digues en comparaison avec les résultats du SCPT16-67, qui est le seul essai effectué loin de ces ouvrages drainants. Ceci indique donc que les digues et les inclusions permettent aux résidus de se consolider ce qui cause les mesures de V_s (et donc V_{sl}) d'être plus grandes. Il peut être noté que la tendance d'obtenir des vitesses des ondes de cisaillement plus grandes pour le SCPT16-71 comparé aux valeurs du SCPT16-67 est également présente sur la Figure 6-7 (b), qui illustre les V_{sl} obtenues avec la corrélation calibrée présentée précédemment. Cependant, les données obtenues avec la corrélation calibrée sous l'élévation 325 m ont été ignorées dans la Figure 6-7 (b) car il est connu que d'anciens résidus ainsi que de l'argile se trouvent près de cette élévation. La corrélation n'est pas calibrée adéquatement pour ce changement de matériau et donnerait des valeurs imprécises de V_{sl} .

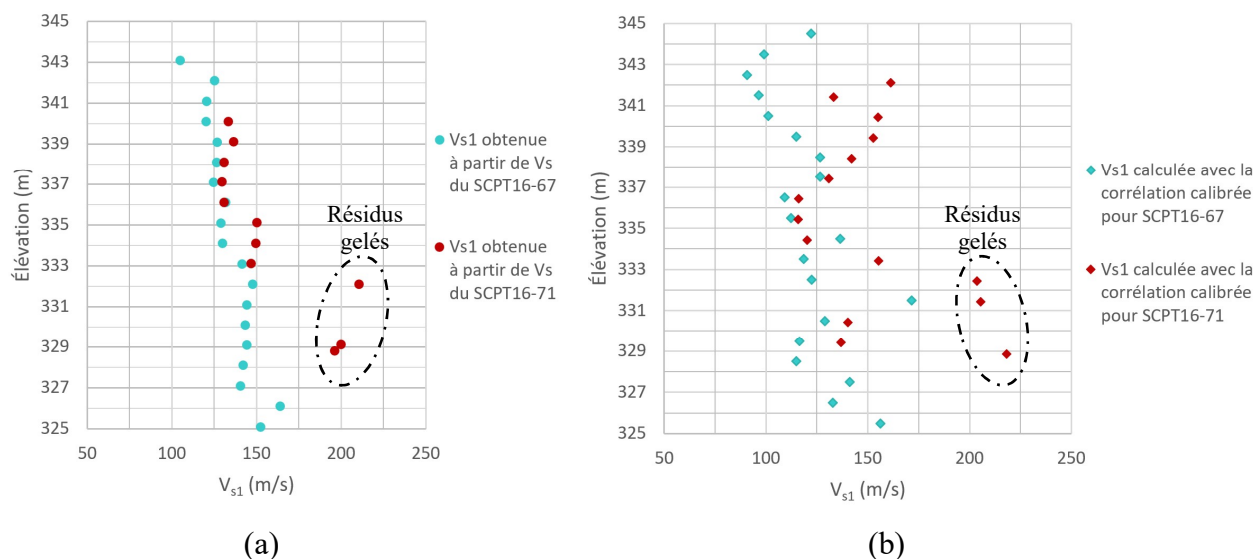


Figure 6-7 : Comparaison des vitesses d'ondes de cisaillement (a) obtenues sur le terrain;
(b) obtenues avec la corrélation calibrée

6.2.6 Influence des inclusions sur l'indice de consolidation

Tel que mentionné précédemment, il peut être remarqué dans la Figure 5-20 et la Figure 5-21 que l'indice I_U est supérieur ou égal à 1 sur la majorité de la profondeur de l'essai SCPT16-71 effectué près des inclusions alors qu'il est majoritairement plus petit que 1 pour le SCPT16-67. Cette remarque est valable pour tous les SCPTu/CPTu effectués près de ces ouvrages. Pour les SCPT16-66, CPT13-01, CPT13-05 et CPT13-06 qui dénotent un état de consolidation similaire à celui du SCPT16-67, I_U est majoritairement inférieur à 1, indiquant qu'ils sont sous-consolidés sur une grande partie de la profondeur testée. Les graphiques illustrant la valeur de I_U pour tous les essais de pénétration au cône de 2013 et 2016 sont montrés en Annexe 8 et 9 respectivement.

6.3 Comparaison des conditions *in situ* de 2013 et 2016

L'évolution des conditions *in situ* entre 2013 et 2016 est étudiée et est présentée dans cette section. Tel qu'illustré dans la Figure 4-7 et la Figure 4-10 du Chapitre 4, les CPT13-03 et CPT13-04 et SCPT16-72 ont été réalisés à des emplacements proches, au voisinage de la Digue Ouest. Malheureusement, ces CPTu n'ont pas été effectués sur les mêmes profondeurs rendant l'analyse comparative difficile. Seuls les CPT13-01, CPT13-02 et SCPT16-68 près de la Digue 5 ont donc été considérés dans l'analyse présentée dans cette section. L'emplacement des essais

analysés sont illustrés dans la Figure 6-8 (en vert pour les CPTu de 2013 et en rouge pour le SCPTu de 2016). Le sommet des bermes des digues datant de 2015 est montré en noir sur la figure. Cette étude discute des variations des mesures obtenues par le cône, des contraintes effectives et des pressions interstitielles *in situ*, du poids volumique, du module de cisaillement, de la vitesse des ondes de cisaillement et de l'indice de consolidation sur la période de 3 ans.



Figure 6-8 : Emplacement des CPT13-01, CPT13-02 et SCPT16-68 (photo prise en juin de 2015)
(Golder, 2015)

Tel que mentionné précédemment, il y a eu des problèmes de lecture durant l'essai SCPT16-68, il y a donc des données manquantes de q_c , f_s et u entre l'élévation 328 et 328.7 m. Pour faciliter la comparaison, il est aussi important de noter que seules les mesures prises aux mêmes élévations dans les trois essais sont présentées dans les figures suivantes et non pas les données recueillies sur toute la profondeur de chaque essai. Par ailleurs, les données obtenues pour les élévations en dessous de 325 m ont été ignorées dans l'analyse considérant qu'il y a un changement de matériau à cette profondeur. L'ensemble des données obtenues durant les essais CPTu et SCPTu est présentée en Annexe 6 et 7.

6.3.1 Lectures du cône

En comparant les mesures de la résistance en pointe des trois essais (voir Figure 6-9), il peut être remarqué que les valeurs de q_c du SCPT16-68 varient avec une tendance similaire à celles du CPT13-02 et sont généralement plus grandes que les valeurs de q_c du CPT13-01 et du CPT13-02. Il est connu qu'entre les élévations 330 et 333 m du CPT13-02, les résidus étaient gelés ce qui explique la zone de très grandes valeurs de q_c (Golder, 2014). Cette zone peut également être remarquée dans les lectures de q_c du SCPT16-68 indiquant que des résidus gelés s'y trouvent probablement. La différence entre les résistances en pointe du SCPT16-68 et CPT13-02 se trouve généralement entre 500 et 1 200 kPa, si les élévations où il y a des résidus gelés sont ignorées. Ceci indique que les résidus ont gagné en résistance d'une magnitude moyenne de 7 000 kPa sur la période de 3 ans. Il est important de se rappeler que ces essais ont été réalisés à proximité de la Digue 5 et que, tel que mentionné dans la section 6.2, les CPT13-02 et SCPT16-68 ont été influencés par la proximité de cet ouvrage, alors que le CPT13-01 semble ne pas avoir été influencé. Ainsi, ce gain en résistance n'est pas représentatif du gain de résistance pour les résidus plus au centre du parc. Il peut être remarqué que la différence entre la résistance en pointe des deux CPTu effectués en 2013 est considérable, confirmant également que le CPT13-01 n'est pas influencé par les ouvrages drainants.

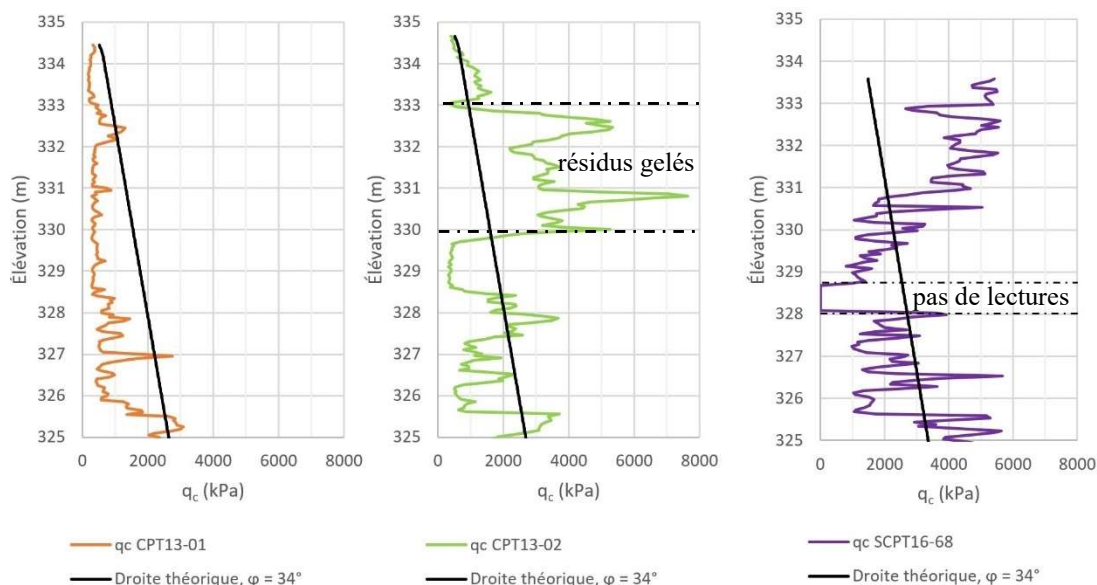


Figure 6-9 : Comparaison des mesures de résistance en pointe des CPT13-01, CPT13-02 et SCPT16-68

En observant les lectures de frottement sur le manchon des trois essais sur la Figure 6-10, une similitude des lectures du CPT13-02 et SCPT16-68 est également remarquée. En moyenne, la différence entre les lectures de f_s de ces deux essais si les couches gelées sont ignorées est de moins de 10 kPa. Ceci indique que le frottement sur le manchon n'est pas relié au degré de consolidation des résidus, ce qui était anticipé.

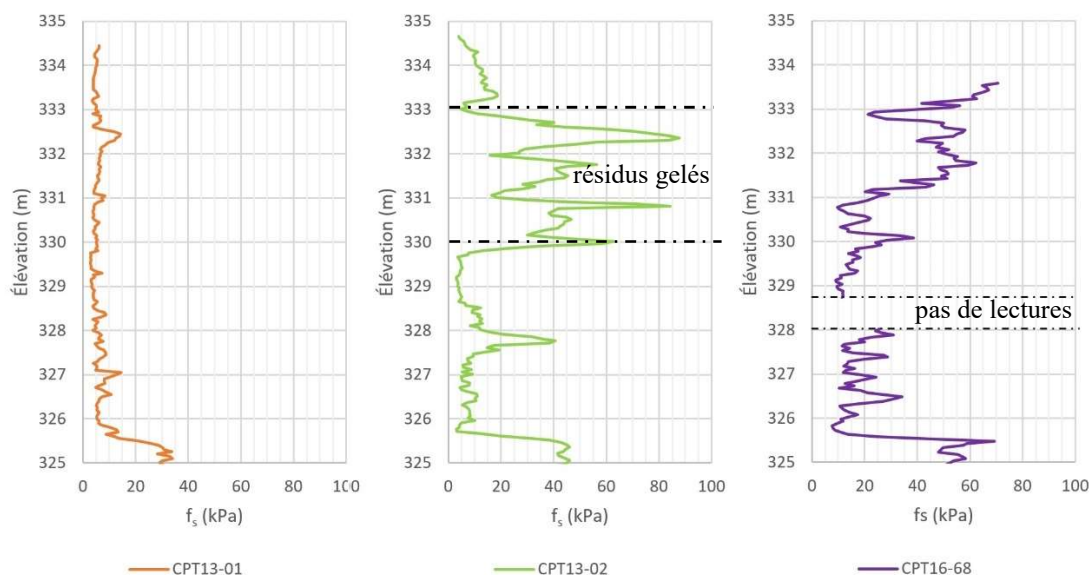


Figure 6-10 : Comparaison des mesures de frottement sur le manchon des CPT13-01, CPT13-02 et SCPT16-68

À partir de la Figure 6-11, une comparaison de la variation des pressions interstitielles des trois essais de pénétration au cône peut être faite. Il peut être remarqué que les pressions interstitielles des résidus des essais CPT13-02 et SCPT16-68 suivent des tendances similaires. Aussi, tel qu'illustré en mauve, le $u_{in situ}$ du SCPT16-68 est considérablement plus petit que la pression interstitielle détectée par le cône (en gris) durant l'essai. Ceci est dû au fait que les résidus de 2016 sont un peu plus denses et donc un peu moins perméables qu'en 2013. Ceci fait en sorte qu'il y a davantage de génération de pression en excès durant la pénétration, donc le u détecté par le cône est plus grand que le $u_{in situ}$. En général, les pressions interstitielles *in situ* des CPT13-02 et SCPT16-68 sont plus près des valeurs de la pression hydrostatique que les $u_{in situ}$ du CPT13-01. Ceci est en accord avec ce qui a été discuté dans la section 6.2 sur l'influence des digues et des inclusions sur la pression interstitielle *in situ*. Il est peut également être remarqué sur la Figure 6-11 qu'il y a de la succion ($u_{in situ} < 0$) dans les couches de résidus gelés. Ceci est due au comportement dilatant de la glace (Andersland & Ladanyi, 1994).

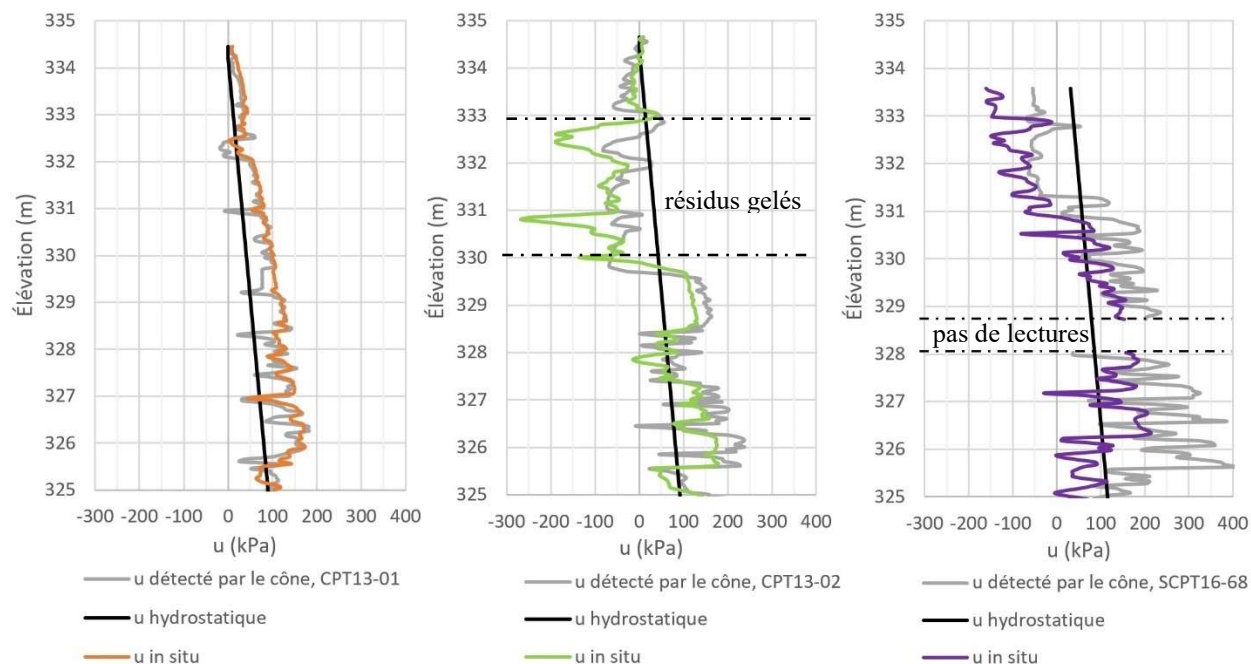


Figure 6-11 : Comparaison des pressions interstitielles des CPT13-01, CPT13-02 et SCPT16-68

6.3.2 Conditions *in situ*

La variation des contraintes effectives *in situ* obtenues avec la relation de Chen et Juang (1996) pour les trois essais de pénétration au cône peut être observée dans la Figure 6-12. De fortes contraintes effectives sont calculées pour les CPT13-02 et SCPT16-68 entre les élévations 330 et 333 m à cause de la couche de résidus gelés. En général, il peut être remarqué que les contraintes effectives *in situ* de ces deux essais sont relativement près des contraintes effectives si u était hydrostatique contrairement aux contraintes effectives du CPT13-01. Ceci indique que les résidus à ces deux emplacements sont plus consolidés que ceux du CPT13-01. Cette conclusion est en accord avec ce qui a été observé précédemment.

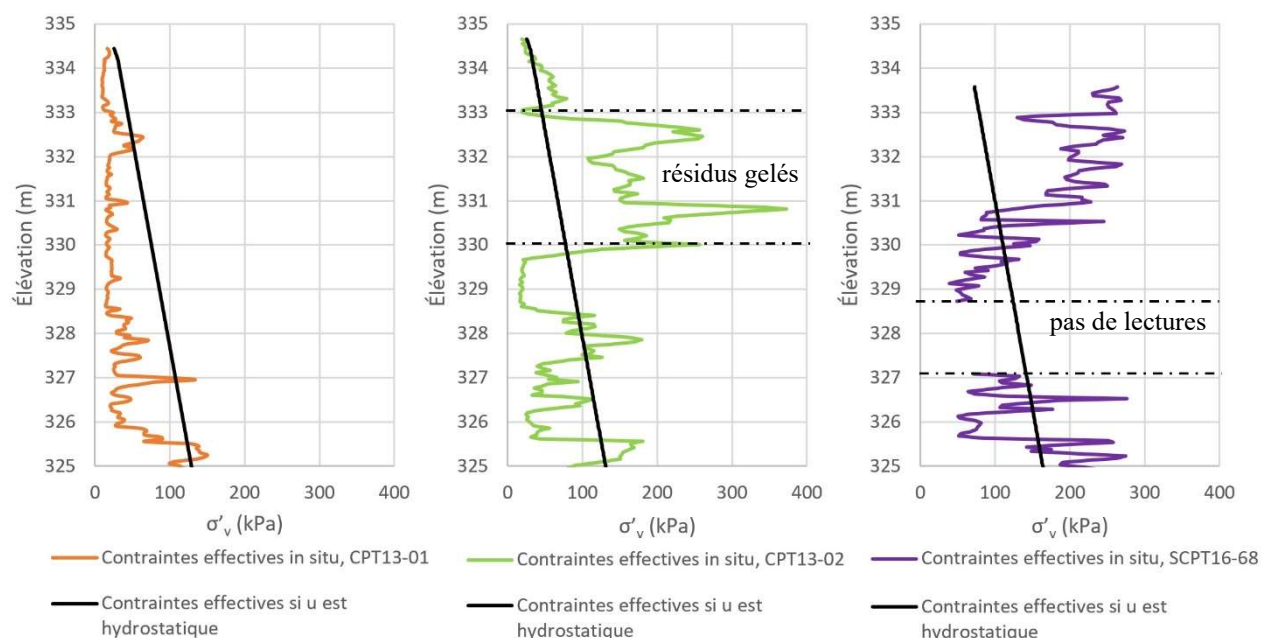


Figure 6-12 : Comparaison des contraintes effectives *in situ* des CPT13-01, CPT13-02 et SCPT16-68

Tel qu'illustré sur la Figure 6-11, les pressions interstitielles *in situ* des résidus aux emplacements des essais CPT13-02 et SCPT16-68 varient de façon similaire. Les fortes lectures de succion ($u_{in situ} < 0$) entre les élévations 330 et 333 m de ces deux essais indiquent la présence de résidus gelés. Les trois essais indiquent de grandes variations en $u_{in situ}$, cependant, il peut être remarqué que $u_{in situ}$ des CPT13-02 et SCPT16-68 sont plus près et croisent davantage la droite de la pression interstitielle hydrostatique que $u_{in situ}$ du CPT13-01. Ceci indique que les résidus de ces deux emplacements sont plus près d'être normalement consolidés que les résidus du CPT13-01.

6.3.3 Poids volumique

La variation du poids volumique des résidus des essais CPT13-01, CPT13-02 et SCPT16-68 est montrée dans la Figure 6-13. Il peut être remarqué que les valeurs en mauve sont supérieures à celles en orange et en vert indiquant que le poids volumique des résidus en 2016 est généralement plus grand que celui des résidus de 2013. Ceci est en accord avec ce qui a été mentionné précédemment. En effet, des résidus plus consolidés deviennent plus denses et donc leur poids volumique augmente.

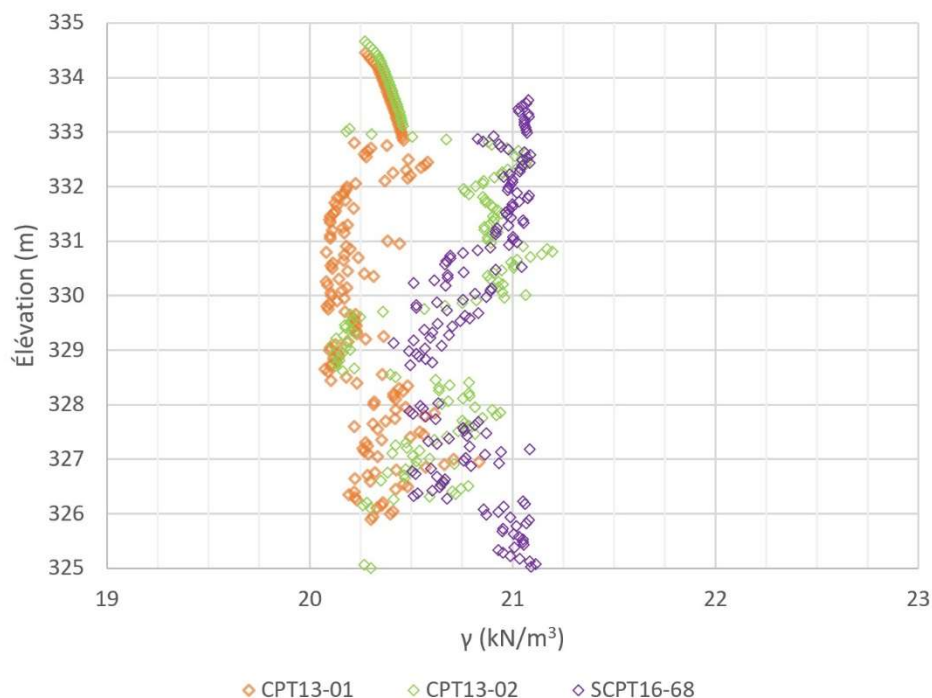


Figure 6-13 : Comparaison du poids volumique des CPT13-01, CPT13-02 et SCPT16-68

6.3.4 Module de cisaillement

Les modules de cisaillement obtenus à l'aide de la corrélation calibrée (équation [5-4]) pour les trois essais de pénétration au cône sont illustrés dans la Figure 6-14. Il peut être remarqué que le G_{max} des résidus du SCPT16-68 est considérablement plus important que celui du CPT13-01 et légèrement plus grand que celui du CPT13-02. Ceci indique que les résidus sont plus rigides près des digues et des inclusions et que cette rigidité augmente avec le temps. Cependant, la différence entre les valeurs du SCPT16-68 et CPT13-02 n'est pas considérable, ce qui indique que les résidus testés durant ces deux essais sont relativement semblables en terme d'état de consolidation et de conditions *in situ*, ce qui a été démontré et discuté dans les sections antérieures. Il peut être remarqué que le G_{max} du CPT13-01 varie généralement entre 30 et 40 MPa, ce qui correspond aux valeurs obtenues pour le SCPT16-67 situé également à une emplacement qui n'est pas sous l'influence des digues et des inclusions. Le G_{max} des CPT13-02 et SCPT16-68 varient majoritairement entre 40 et 60 MPa, ce qui est similaire aux valeurs obtenues pour le SCPT16-71 près de digues et d'inclusions.

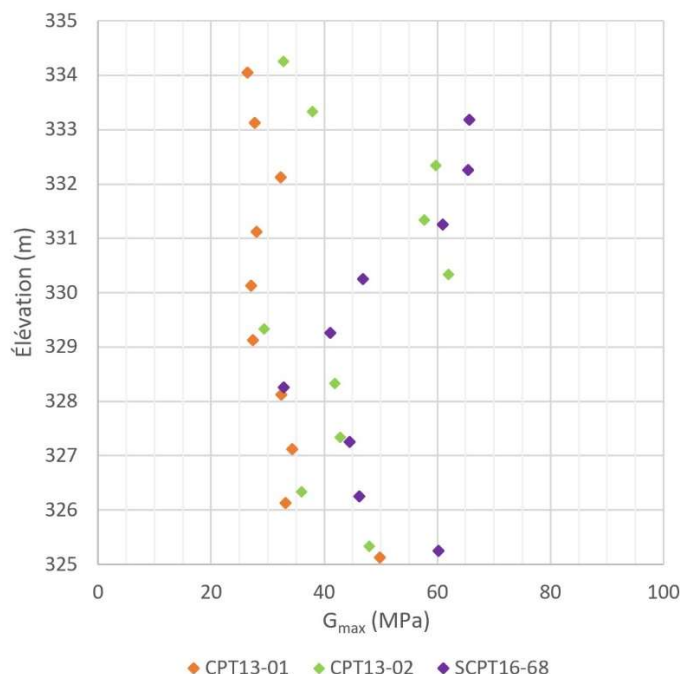


Figure 6-14 : Comparaison des modules de cisaillement des CPT13-01, CPT13-02 et SCPT16-68 obtenus avec la corrélation calibrée

6.3.5 Vitesse des ondes de cisaillement

Les vitesses d'ondes de cisaillement normalisées obtenues à l'aide de la corrélation calibrée (équation [5-5]) pour les CPT13-01, CPT13-02 et SCPT16-68 sont présentées dans la Figure 6-15. Il peut être remarqué que les valeurs de V_{sl} pour le SCPT16-68 sont supérieures à celles calculées pour les deux autres essais. Ceci est dû au fait que les résidus de 2016 sont plus consolidés et plus denses. Les valeurs de V_{sl} pour les résidus près des inclusions et des digues varient généralement autour de 150 m/s, comme cela peut être remarqué pour les résultats du CPT13-02, SCPT16-68 et SCPT16-71 illustrés dans les Figures 6-15 et 6-7 (b). Pour les résidus moins consolidés, qui ne sont pas influencés par ces ouvrages tel que le CPT13-01 et le SCPT16-67, les V_{sl} varient généralement entre 100 et 125 m/s comme cela peut être remarqué sur les Figures 6-15 et 6-7 (b) respectivement.

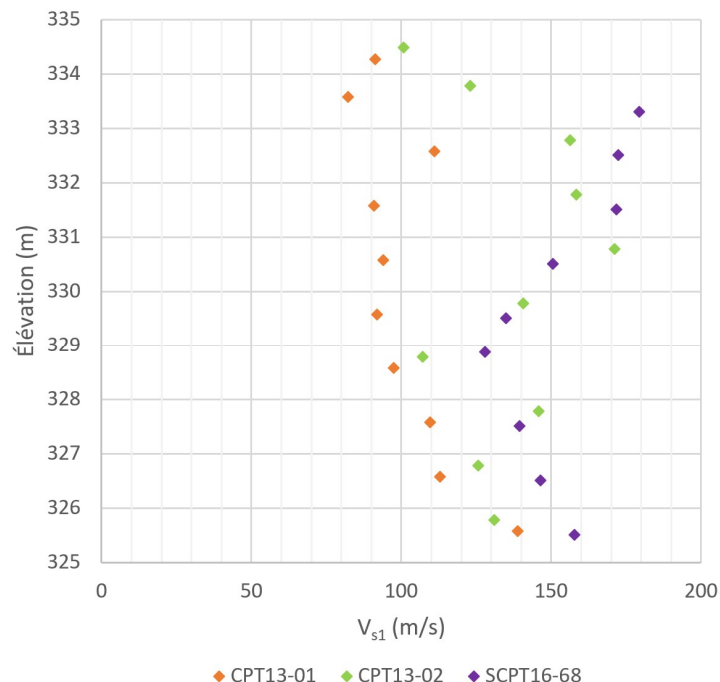


Figure 6-15 : Comparaison des vitesses d'ondes de cisaillement des CPT13-01, CPT13-02 et SCPT16-68 obtenues avec la corrélation calibrée

6.3.6 Indice de consolidation

L'indice de consolidation, I_U , tel que défini précédemment dans ce mémoire donne une indication de l'état de consolidation des résidus *in situ*. Les valeurs de I_U pour les CPT13-01, CPT13-02 et SCPT16-68 sont illustrées dans la Figure 6-16. Les valeurs de I_U obtenues pour les trois essais sont majoritairement plus petites que 1, si la couche de résidus gelés est ignorée, ce qui indique que les résidus sont sous-consolidés. Les valeurs obtenues au-dessus de l'élévation 333 m indiquent que les résidus du CPT13-02 et SCPT16-68 sont surconsolidés, ce qui est la même conclusion que celle tirée à partir de la Figure 6-9 de la section 6.2. Généralement, il peut être remarqué que les valeurs du SCPT16-68 et du CPT13-02 sont plus près de l'unité que les valeurs du CPT13-01. Ceci confirme que les résidus de l'essai CPT13-01 sont moins consolidés que ceux retrouvés dans les deux autres essais. Cette conclusion est en accord avec celles tirées dans les sections précédentes.

En comparant les valeurs de I_U du CPT13-02 et SCPT16-68 aux élévations entre 325 m et 330 m et en ignorant la couche où il n'y a pas eu de lectures avec le cône du SCPT16-68 (entre 328 et 328.7 m), il peut être remarqué que les valeurs de I_U ont augmenté entre 2013 et 2016. En effet, une augmentation moyenne de 0.29 est constatée entre les données du CPT13-02 et SCPT16-68.

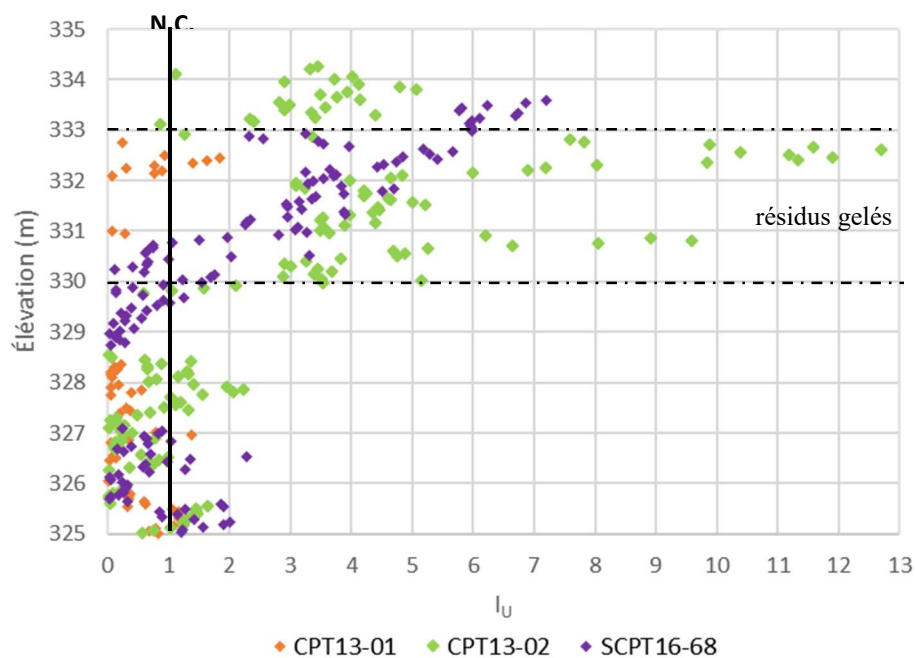


Figure 6-16 : Comparaison des indices de consolidation des CPT13-01, CPT13-02 et CPT16-68

CHAPITRE 7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La stabilité des parcs à résidus miniers est une préoccupation majeure de l'industrie minière et elle dépend, entre autres, des caractéristiques des résidus. Des incertitudes considérables liées à l'évaluation de la stabilité de ces parcs à résidus sont en partie attribuables à la nature évolutive des propriétés des résidus au cours de leur cycle de vie, ainsi qu'aux manques de compréhensions et aux interprétations parfois erronées des conditions *in situ*. Les résidus miniers sont généralement déposés hydrauliquement ce qui les rend très stratifiés, saturés, initialement lâches, et particulièrement sensibles à la liquéfaction statique et dynamique. Il est également connu que les résidus tendent à se comporter différemment des sols naturels de graduation similaire, de sorte que l'applicabilité des corrélations existantes reliant les résultats d'essais *in situ* et les propriétés de ce matériau est incertaine.

Pour déterminer les caractéristiques des sols naturels normalement consolidés ou surconsolidés, l'essai de pénétration au cône est un essai *in situ* qui s'est démontré efficace, rapide, économique et précis. Dans le cas des résidus miniers, l'applicabilité des corrélations existantes reliant les mesures du CPT et les propriétés géotechniques du matériau n'a toutefois pas été confirmée. Une approche traditionnelle d'échantillonnage et d'essais en laboratoire n'est pas efficace considérant la grandeur d'un parc à résidus, le petit volume d'échantillon représentatif qui peut être extrait avec succès ainsi que le niveau de difficulté pour obtenir un échantillon intact de ce matériau sans cohésion. Cette recherche a donc eu pour objectif d'évaluer les propriétés géotechniques des résidus miniers à l'aide d'essais conventionnels et d'essais CPT en laboratoire afin de valider l'applicabilité des corrélations existantes développées pour des sols naturels sur les résidus miniers de Canadian Malartic. De plus, la calibration de ces corrélations a été effectuée, lorsque possible, pour obtenir des résultats qui concordent avec les propriétés des résidus connues. Finalement, une méthodologie a été développée pour analyser les données des essais CPT sur le terrain et une analyse des conditions *in situ* du le parc à résidus de Canadian Malartic en 2013 et 2016 a été incluse dans ce travail. Le but général a été de contribuer à acquérir une meilleure compréhension du comportement des résidus à court et à long terme pour, éventuellement, améliorer les analyses de stabilité statique et dynamique du parc à résidus de Canadian Malartic.

Les essais réalisés à Sherbrooke sur l'appareil de simulation CPT ont été très utiles pour confirmer la validité des corrélations existantes pour les résidus miniers. Malheureusement, des comparaisons directes entre les essais en laboratoire et ceux sur le terrain ont été limitées car la pression de consolidation maximale atteinte en laboratoire a été d'environ 110 kPa. Par ailleurs, certaines corrélations ont été développées à de plus hautes contraintes, il n'a donc pas été possible de confirmer leur validité. Également, le cône utilisé en laboratoire n'avait pas de capteur de pressions interstitielles limitant ainsi la validation de certaines relations. Malgré quelques difficultés encourues en laboratoire, les résultats obtenus ont permis une meilleure compréhension des résidus miniers et la vérification de l'applicabilité des corrélations existantes ainsi que leur calibration.

À l'aide de la relation de Chen et Juang (1996) qui estime correctement l'angle de frottement interne effectif des résidus à partir des lectures de q_c , il a été possible de déterminer les contraintes effectives ainsi que les pressions interstitielles *in situ* dans le parc à résidus de Canadian Malartic. De plus, ces nouvelles informations ont été utilisées dans les différentes équations calibrées pour déterminer le poids volumique, le module de cisaillement et la vitesse des ondes de cisaillement équivalente pour les résidus en place. La relation de Chen et Juang (1996) permet aussi d'analyser l'évolution de q_c et u en fonction du temps et en fonction de la proximité de l'essai CPT aux inclusions et aux digues en connaissant les valeurs de q_c et u à l'état normalement consolidé. La comparaison des contraintes *in situ* entre 2013 et 2016 a démontré une importante augmentation de la résistance en pointe, une diminution de la pression interstitielle en excès et une légère augmentation des propriétés des résidus. Il a également été confirmé que les inclusions et les digues ont bel et bien un effet positif sur la consolidation, le drainage et les propriétés des résidus. Cette analyse est un élément important pour la recherche reliée à l'optimisation de l'utilisation des inclusions dans les parcs à résidus. Elle offre aussi des valeurs précises des propriétés des résidus *in situ* ce qui peut améliorer les analyses de stabilité statique et dynamique des parcs à résidus.

De façon générale, il a été démontré dans ce mémoire que les corrélations basées sur les sols naturels ne sont pas appropriées pour les résidus miniers et que ceux-ci sont sous-consolidés sur la majorité de leur épaisseur. Des corrélations spécifiques au site, telles que celles présentées dans ce projet, sont recommandées pour obtenir les propriétés des résidus. La suite de ces travaux devrait inclure l'utilisation d'un piézocône en laboratoire ce qui permettrait d'obtenir des lectures

de u durant l'essai et ainsi valider et calibrer davantage de corrélations. Également, une analyse numérique de l'essai CPT dans la cellule instrumentée de laboratoire permettrait d'observer les générations de pressions interstitielles lors de la pénétration du cône ainsi que l'effet de confinement possible dû à la paroi extérieure rigide. Il serait pertinent d'étudier l'historique de déposition du parc à résidus de la mine Canadian Malartic et de faire une analyse numérique du parc, en simulant la méthode de déposition par couches, pour confirmer les contraintes effectives et les pressions interstitielles *in situ* obtenues avec la relation Chen et Juang (1996). Il serait aussi intéressant de réaliser davantage d'essais CPT vers le centre du parc pour avoir une idée de l'état de ces résidus, considérant que tous les CPTu et SCPTu réalisés en 2013 et 2016 étaient relativement près des digues et que leurs résultats ne sont pas représentatifs des conditions *in situ* au centre du parc. Cela permettrait également d'estimer la zone d'influence des digues et des inclusions sur le comportement des résidus. Il serait également recommandé de diminuer la vitesse de pénétration du cône dans les résidus sur le terrain dans le but de limiter la génération de pressions interstitielles en excès. Tel que mentionné précédemment, une pénétration trop rapide affecte les lectures de u à hausse ce qui a un impact sur la lecture de q_c également. Tel que mentionné dans la section 2.3.2.6, la relation Chen et Juang (1996) n'utilise pas la résistance en pointe corrigée, il est donc important que la pénétration du cône se fasse en conditions drainées ($q_c \approx q_t$).

BIBLIOGRAPHIE

- Andersland, O. B., & Ladanyi, B. (1994). *An Introduction to Frozen Ground Engineering*. New York : Chapman & Hall.
- Archambault-Alwin, X., James, M., & Karray, M. (2017a). The influence of back pressure on the cyclic resistance of tailings using the triaxial-simple shear device. *GeoOttawa 2017*. Ottawa, ON.
- Archambault-Alwin, X., M., J., Karray, M., & Chekired, M. (2017b). Analysis of cyclic testing of tailings using the triaxial-simple shear (TxSS) apparatus. *GeoOttawa 2017*. Ottawa, ON.
- ASTM D2216. (2010). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. *Annual Book of ASTM Standards : Soil and Rock*.
- ASTM D1557. (2012). Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort. *Annual Book of ASTM Standards : Soil and Rock*.
- ASTM D3080. (2011). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. *Annual Book of ASTM Standards : Soil and Rock*.
- ASTM D422. (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. *Annual Book of ASTM Standards : Soil and Rock*.
- ASTM D4253. (2016). Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table. *Annual Book of ASTM Standards : Soil and Rock*.
- ASTM D4254. (2016). Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density. *Annual Book of ASTM Standards : Soil and Rock*.
- ASTM D4318. (2010). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. *Annual Book of ASTM Standards : Soil and Rock*.
- ASTM D5778. (2012). Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils. *Annual Book of ASTM Standards : Soil and Rock, 04.08*.
Tiré de www.astm.org

- ASTM D854. (2014). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. *Annual Book of ASTM Standards : Soil and Rock*.
- Ates, S., & Constantinou, M. C. (2011). Example of application of response spectrum analyses for seismically isolated curved bridges including soil foundation effects. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 31, 648-661.
- Aubertin, M. (2011). *Stabilité des sites d'entreposage de rejets miniers : revue de l'état des connaissances et recommandations pour les critères du guide sur la restauration des sites miniers du MRNF*. Chaire industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT, Environnement et gestion des rejets miniers, Montréal.
- Aubertin, M., Bussière, B., & Bernier, L. (2002). Manuel on CD-ROM : Environnement et Gestion des Rejets Miniers. Presses internationales Polytechnique.
- Aubertin, M., James, M., & Bussière, B. (2016). Subvention de recherche et développement coopératif : Optimization of the Use of Waste Rock Inclusions in Tailings Impoundments to Improve Short and Long-term Performance. *Colloque de l'IRME UQAT-Polytechnique*. Montréal.
- Bolduc, F. (2012). Une étude sur l'utilisation des roches stériles comme inclusions drainantes dans les résidus miniers. (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal, QC).
- Bolduc, F., & Aubertin, M. (2014). Numerical investigation of the influence of waste rock inclusions on tailing consolidation. *Canadian Geotechnical Journal*, 51, 1021-1032.
- Bolton, M. D., & Gui, M. W. (1995). Modelling of Sand Over a Wide Stress Range Using FLAC. Cambridge University Engineering Department.
- Bolton, M. D., Gui, M. W., Garnier, J., Corte, J. F., & Laue, J. R. (1999). Centrifuge cone penetration tests in sand. *Geotechnique*, 543-552.
- Boufrina, T., & Bouafia, A. (2014). Numerical modelling of CPT in clay to evaluate bearing capacity for shallow foundation. *3rd International Symposium on Cone Penetration Testing*, (pp. 517-524). Las Vegas, Nevada, USA.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design*. McGraw-Hill Companies, Inc.

- Bussière, B. (2007). Colloquium 2004 : Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches. *Canadian Geotechnical Journal*, 44, 1019-1052.
- Canadian Malartic. (2014). À propos du partenariat : Survol. Malartic, Québec, Canada. Tiré de <http://www.canadianmalartic.com/Apropos-partenariat.html>
- Ceccato, F., Beuth, L., & Simonini, P. (2016). Analysis of Piezocone Penetration under Different Drainage Conditions with the Two-Phase Material Point Method. *Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Chai, J. C., Hossain, J., J., Y. D., Shen, S. I., & Carter, J. P. (2016). Pore pressures induced by piezocone penetration. *Canadian Geotechnical Journal*, 53, 540-550.
- Chen, J. W., & Juang, C. H. (1996). Determination of Drained Friction Angle of Sands from CPT. *Journal of Geotechnical Engineering*, 374-381.
- ConeTec. (2013). *Presentation of In Situ Test Results for : Osisko Tailings Characterization*. Malartic, Quebec.
- ConeTec. (2016). *Presentation of site investigation results : Caractérisation des résidus*.
- Contreras, C. (2013). Comportement dynamique du sol pulvérulent "résidus miniers". (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal, QC).
- Contreras, C., & James, M. (2013). A laboratory investigation of the cyclic resistance of tailings. *GeoMontreal 2013*.
- Das, B. M. (2002). *Advanced soil mechanics* (2nd Edition ed.). London : Spon Press.
- Davies, M. P. (1999). Piezocone Technology for the Geoenvironmental Characterization of Mine Tailings. (PhD thesis, University of British Columbia, AB).
- de la Vergne, J. (2014). *Hard Rock Miner's Handbook*. Edmonton, Alberta : Stantec Consulting.
- Eslami, A., & Mohammadi, A. (2016). Drained soil shear strength parameters from CPTu data for marine deposits by analytical model. *Ships and Offshore Structures*, 913-925.

- Essayad, K. (2015). Développement de protocoles expérimentaux pour caractériser la consolidation des résidus miniers saturés et non saturés à partir d'essais de compression en colonne. (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal, QC).
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs.
- Ghali, M., Karray, M., Chekirad, M., & Roubtsova, V. (2015). Laboratory investigation on the effect of grain size distribution of granular material on cone penetration test results. *GeoQuébec 2015*.
- Golder Associés Ltée. (2014). *Conception du prolongement du parc à résidus et des haldes à stériles*. Malartic, QC.
- Golder Associés Ltée. (2014). *Rapport de caractérisation des résidus miniers*. Malartic, QC.
- Golder Associés Ltée. (2015). Plan de la mine Canadian Malartic. Malartic, QC.
- Golder Associés Ltée. (2016). *Revue de la stabilité de la digue 5 en conditions actuelles, détermination de seuils d'alerte et mise en place d'un plan d'action*. Malartic, Québec.
- Google. (2017). *Google maps*. Tiré de <https://www.google.ca/maps?source=tldsi&hl=en>
- Grimard, L. P., & James, M. (2017). A Study of the Static Liquefaction of Tailings. *GeoOttawa 2017*. Ottawa, ON.
- Grimard, L. P., James, M., Karray, M., & Mhenni, A. (2017). Physical and mechanical charaterisation of hydraulically deposited tailings using shear wave velocity. *GeoOttawa 2017*. Ottawa, ON.
- Hardin, B. O., & Richart, F. E. (1963). Elastic wave velocities in granular soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 39-56.
- Henderson, M. E., Purdy, J., & Delaney, T. (2002). Performance of vertical wick drains at the Atlas Moab Uranium Mill tailings facility after 1 year. *Tailings and Mine Waste '02* (pp. 387-391). Colorado : Swets & Zeitlinger.
- Holmsgaard, R., Nielsen, B. N., & Ibsen, L. M. (2015). Interpretation of Cone Penetration Testing in Silty Soils Conducted under Partially Drained Conditions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. doi :10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001386

- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2010). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Pearson.
- Jaeger, R. A. (2012). Numerical and Experimental Study on Cone Penetration in Sands and Intermediate Soils. (Doctorate Thesis, University of California, US).
- James, M. (2009). The use of waste rock inclusions to control the effects of liquefaction in tailings impoundments. (Mémoire de doctorat, Polytechnique Montréal, QC).
- James, M., & Aubertin, M. (2010). On the Dynamic Response of Tailings and the Stability of Tailings Impoundments for Hard Rock Mines. *Geotechnical News*, 39-43.
- James, M., & Aubertin, M. (2016). Comparison of Numerical and Analytical Liquefaction Analyses of Tailings. *Geotechnical and Geological Engineering Journal*, 35, 277-291.
- James, M., Aubertin, M., Bussière, B. P., Pépin, N., & Limoges, M. (2017). A research project on the use of waste rock inclusions to improve the performance of tailings impoundments. *GeoOttawa 2017*. Ottawa, ON.
- Jaouhar, E., Aubertin, M., & James, M. (2011). Effect of waste rock inclusions on the consolidation of tailings. *Pan-Am CGS Geotechnical Conference*. Toronto.
- Karray, M., & Hussien, M. (2017). Shear wave velocity as function of cone penetration resistance and grain size for Holocene-age uncemented soils : an new perspective. *Acta Geotechnica*. doi :10.1007/s11440-016-0520-2
- Kim, K., Prezzi, M., Salgado, R., & Lee, W. (2008). Effect of penetration rate on cone penetration resistance in saturated clayey soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(6), 674-683.
- Kulhawy, F. H., & Mayne, P. W. (1990). *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design*. Electric Power Institute.
- Lunne, T., Powell, J. J., & Robertson, P. K. (1997). *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*.
- Mayne, P. W. (2007). In-situ test calibrations for evaluating soil parameters. *Characterization & Engineering Properties of Natural Soils*, 3, pp. 1602-1652.

- Mayne, P. W. (2013). *Engineering Design Using the Cone Penetration Test - Geotechnical Applications Guide*. ConeTec.
- Meigh, A. C. (2013). *Cone penetration testing : methods and interpretation*. Elsevier.
- Mestat, P. (1998). État de contraintes initiales dans les sols et calcul par éléments finis. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 215, pp. 15-32.
- Mo, P. Q., Marshall, A. M., & Yu, H. S. (2016). Interpretation of Cone Penetration Test Data in Layered Soils Using Cavity Expansion Analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Omidvar, M., Iskander, M., & Bess, S. (2014). Response of granular media to rapid penetration. *International Journal of Impact Engineering*, 60-82.
- Pedroni, L., & Aubertin, M. (2013). Measurement and simulation of the large strain consolidation of AMD treatment sludge. *GeoMontréal 2013*. Montréal.
- Poncelet, N. (2012). Élaboration et implémentation d'un protocole de laboratoire pour l'étude du potentiel de liquéfaction de résidus miniers. (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal, QC).
- Qiu, Y., & Sego, D. (2001). Laboratory Properties of Mine Tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 183-190.
- Raju, K. V. (2010). Tip Resistance of a Miniature Cone Penetrometer Using Triaxial Apparatus for Clean and Silty Sand. (Doctorate Thesis, Indian Institute of Science, Bangalore, India).
- Robertson, P. K. (1990). Soil classification using cone penetration test. *Journal Canadien de Géotechnique*, 27(1), 351-360.
- Robertson, P. K. (1990). Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 27, pp. 151-158.
- Robertson, P. K. (2009). Interpretation of cone penetration tests - A unified approach. *Journal Canadien de Géotechnique*, 46(11), 1337-1355. doi :10.1139/T09-065
- Robertson, P. K. (2010). *Soil behaviour type from the CPT : an update*, p. 8.

- Robertson, P. K. (2016). Cone penetration test (CPT-based) soil behavior type (SBT) classification system - an update. *Journal Canadien de Géotechnique*, 53, 1910-1927. doi :10.1139
- Robertson, P. K., & Campanella, R. G. (1983). Interpretation of Cone Penetration Tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 20(4), 718-745.
- Robertson, P. K., & Campanella, R. G. (1986). Guidelines for Use and Interpretation of Piezometer Cone Penetration Test.
- Robertson, P. K., & Wride, C. E. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Journal Canadien de Géotechnique*, 35(3), 442-459.
- Robertson, P. K., Campanella, R. G., & Wightman, A. (1983, Novembre). SPT-CPT correlations. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(11).
- Robertson, P. K., Campanella, R. G., Gillespie, D., & Greig, J. (1986). Use of piezometer cone data - In situ testing in Geotechnical Engineering. *ASCE*, 1263-1280.
- Rowe, R. K. (2001). *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook*. Kluwer Academic Publishers.
- Schnaid, F., & Houlsby, G. T. (1991). *An Assessment of Chamber Size Effects in the Calibration of in Situ Tests in Sand*. Oxford.
- Seed, H. B., & De Alba, P. (1986). Use of SPT and CPT tests for evaluating the liquefaction resistance of sands. Use of in situ tests in geotechnical engineering.
- Senneset, K., Sandven, R., & Janbu, N. (1989). Evaluation of soil parameters from piezocone tests. *Transportation Research Record*, pp. 24-37.
- Senneset, K., Sandven, R., Lunne, T., By, T., & Ammundsen, T. (1988). Piezocone tests in silty soils. *Penetration Testing 1988*, pp. 955-974.
- Shuttle, D. A., & Cunning, J. (2007). Liquefaction potential of silts from CPTu. *Canadian Geotechnical Journal*, 44, 1-19. doi :10.1139/T06-086
- Shuttle, D. A., & Cunning, J. (2008). Reply to the discussion by Robertson on "Liquefaction potential of silts from CPTu". *Canadian Geotechnical Journal*, pp. 142-145.

- Société Canadienne de Géotechnique. (2013). *Manuel canadien d'ingénierie des fondations* (4e édition ed.).
- Ulrich, B. F., & Hughes, M. O. (1994). SPT/CPT correlations for mine tailings. *Tailings & Mine Waste '94*, (pp. 215-223). Fort Collins, Colorado, USA.
- Vick, S. G. (1990). *Planning, Design and Analysis of Tailings Dams*. Vancouver, BC : BiTech Publishers Ltd.
- Wares, R. (2013). *La mine Canadian Malartic, partie sud de la Ceinture de l'Abitibi, Québec, Canada : découverte et mise en valeur d'un gisement aurifère archéen à fort tonnage*. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. Tiré de <https://www.mern.gouv.qc.ca/mines/quebec-mines/2013-06/malartic.pdf>
- Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., & Christian, J. T. (2001). Liquefaction Resistance of Soils : Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(10), 817-833.

ANNEXE 1 – RÉSULTATS DES ESSAIS CONVENTIONNELS EN LABORATOIRE

Tamissage 1

Tableau A1-1 : Données du tamissage sur l'échantillon 1

Masse retenue (g)	D (mm)	% Passant
0.0	0.630	100.0
0.0	0.315	100.0
2.0	0.160	97.0
13.5	0.080	79.5

Granulométrie – Hydromètre 1

Tableau A1-2 : Données de la sédimentométrie sur l'échantillon 1

t (min)	T (°C)	R	ΔR	R-ΔR	R'	L (cm)	L/t	√L/t	K (g)	D (mm)	% Passant
0.5	23.5	53.0	5.5	47.5	48.0	8.4	16.86	4.11	0.01286	0.0528	70.9
1.0	23.5	47.0	5.5	41.5	42.0	9.4	9.41	3.07	0.01286	0.0394	61.9
2.0	23.5	41.5	5.5	36.0	36.5	10.3	5.16	2.27	0.01286	0.0292	53.7
4.0	23.5	35.0	5.5	29.5	30.0	11.4	2.85	1.69	0.01286	0.0217	44.0
8.0	23.5	29.0	5.5	23.5	24.0	12.4	1.55	1.24	0.01286	0.0160	35.1
15.0	23.5	25.5	5.5	20.0	20.5	12.9	0.86	0.93	0.01286	0.0119	29.8
30.0	23.5	21.0	5.5	15.5	16.0	13.7	0.46	0.68	0.01286	0.0087	23.1
60.0	23.5	18.0	5.5	12.5	13.0	14.2	0.24	0.49	0.01286	0.0062	18.6
120.0	23.5	14.0	6.0	8.0	8.5	14.9	0.12	0.32	0.01286	0.0041	11.9
240.0	23.5	12.3	5.5	6.8	7.3	15.1	0.06	0.27	0.01286	0.0035	10.1
480.0	24.0	11.0	5.5	5.5	6.0	15.3	0.03	0.20	0.01278	0.0026	8.2
1470.0	23.6	9.0	6.0	3.0	3.5	15.7	0.01	0.10	0.01284	0.0013	4.5

Tamissage 2

Tableau A1-3 : Données du tamissage sur l'échantillon 2

Masse retenue (g)	D (mm)	% Passant
0.0	0.630	100.0
0.0	0.315	100.0
2.3	0.160	96.6
14.5	0.080	78.5

Granulométrie – Hydromètre 2

Tableau A1-4 : Données de la sédimentométrie sur l'échantillon 2

t (min)	T (°C)	R	ΔR	R-ΔR	R'	L (cm)	L/t	√L/t	K (g)	D (mm)	% Passant
0.5	24.4	53.0	5.5	47.5	48.0	8.4	16.86	4.11	0.01272	0.0522	69.1
1.0	24.4	47.5	5.5	42.0	42.5	9.3	9.33	3.05	0.01272	0.0389	61.1
2.0	24.4	42.0	5.5	36.5	37.0	10.2	5.12	2.26	0.01272	0.0288	53.1
4.0	24.4	37.0	5.5	31.5	32.0	11.1	2.76	1.66	0.01272	0.0211	45.8
8.0	24.4	31.5	5.5	26.0	26.5	12.0	1.49	1.22	0.01272	0.0156	37.8
15.0	24.4	27.0	5.5	21.5	22.0	12.7	0.85	0.92	0.01272	0.0117	31.3
30.0	24.4	21.0	6.0	15.0	15.5	13.8	0.46	0.68	0.01272	0.0086	21.8
60.0	24.4	18.0	6.0	12.0	12.5	14.2	0.24	0.49	0.01272	0.0062	17.4
120.0	24.4	15.5	6.0	9.5	10.0	14.7	0.12	0.35	0.01272	0.0045	13.8
240.0	24.6	15.0	6.0	9.0	9.5	14.7	0.06	0.28	0.01269	0.0036	13.1
408.0	24.8	12.0	6.0	6.0	6.5	15.2	0.04	0.19	0.01266	0.0024	8.7
1440.0	24.3	10.5	6.0	4.5	5.0	15.5	0.01	0.10	0.01274	0.0013	6.5

Tamissage 3

Tableau A1-5 : Données du tamissage sur l'échantillon 3

Masse retenue (g)	D (mm)	% Passant
0.0	0.630	100.0
0.0	0.315	100.0
2.6	0.160	96.5
15.9	0.080	78.7

Granulométrie – Hydromètre 3

Tableau A1-6 : Données de la sédimentométrie sur l'échantillon 3

t (min)	T (°C)	R	ΔR	R-ΔR	R'	L (cm)	L/t	√L/t	K (g)	D (mm)	% Passant
0.5	24.6	59.0	5.5	53.5	54.0	7.4	14.89	3.86	0.01269	0.0490	70.3
1.0	24.6	52.5	5.5	47.0	47.5	8.5	8.51	2.92	0.01269	0.0370	61.7
2.0	24.6	46.5	5.5	41.0	41.5	9.5	4.75	2.18	0.01269	0.0277	53.9
4.0	24.6	40.0	5.5	34.5	35.0	10.6	2.64	1.62	0.01269	0.0206	45.3
8.0	24.6	33.5	5.5	28.0	28.5	11.6	1.45	1.21	0.01269	0.0153	36.8
15.0	24.4	30.0	5.5	24.5	25.0	12.2	0.81	0.90	0.01272	0.0115	32.2
30.0	24.5	24.5	6.0	18.5	19.0	13.2	0.44	0.66	0.01271	0.0084	24.3
59.5	24.5	19.0	6.0	13.0	13.5	14.1	0.24	0.49	0.01271	0.0062	17.1
119.5	24.5	16.5	6.0	10.5	11.0	14.5	0.12	0.35	0.01271	0.0044	13.8
240.0	24.6	13.5	6.0	7.5	8.0	15.0	0.06	0.25	0.01269	0.0032	9.9
399.0	24.7	13.0	6.0	7.0	7.5	15.1	0.04	0.19	0.01268	0.0025	9.2
1440.0	24.3	11.5	6.0	5.5	6.0	15.3	0.01	0.10	0.01274	0.0013	7.2

Densité relative des grains

Tableau A1-7 : Essais au pycnomètre

Baril - Chaudière	B3-C3	B4-C11	B4-C12
Température (°C)	23.5	22.7	22.8
Pycnomètre	21	11	21
M_s + recipient (g)	232.69	210.2	373.4
Masse du recipient (g)	180.17	160.6	318.32
M_s (g)	52.52	49.6	55.08
Masse flacon + eau + sol (g)	706.56	696.25	708.18
Masse flacon étalon (g)	673.30	665.08	673.38
Masse + eau - sol (g)	654.04	646.65	653.1
Volume de sol (cm³)	19.26	18.43	20.28
ρ_s (g/cm³)	2.73	2.69	2.71
ρ_w (g/cm³)	0.9974	0.9976	0.9976
G_s (corrigé T⁰)	2.72	2.69	2.71

Indices des vides maximal et minimal

Tableau A1-8 : Résultat d'essai Proctor modifié sur l'échantillon B3-C13

Teneur en eau visée w (%)	10	12	14	16
Masse humide M_t + moule (g)	6178.8	6241.1	6297.6	6254.7
Masse du moule	4310.7	4310.7	4310.7	4310.7
Masse humide M_t (g)	1868.1	1930.4	1986.9	1944.0
Masse sèche M_s (g)	1701.4	1730.5	1759.6	1685.1
ρ_d sol humide (g/cm^3)	1.97	2.03	2.09	2.05
ρ_d (g/cm^3)	1.79	1.82	1.85	1.78
e	0.511	0.486	0.461	0.526

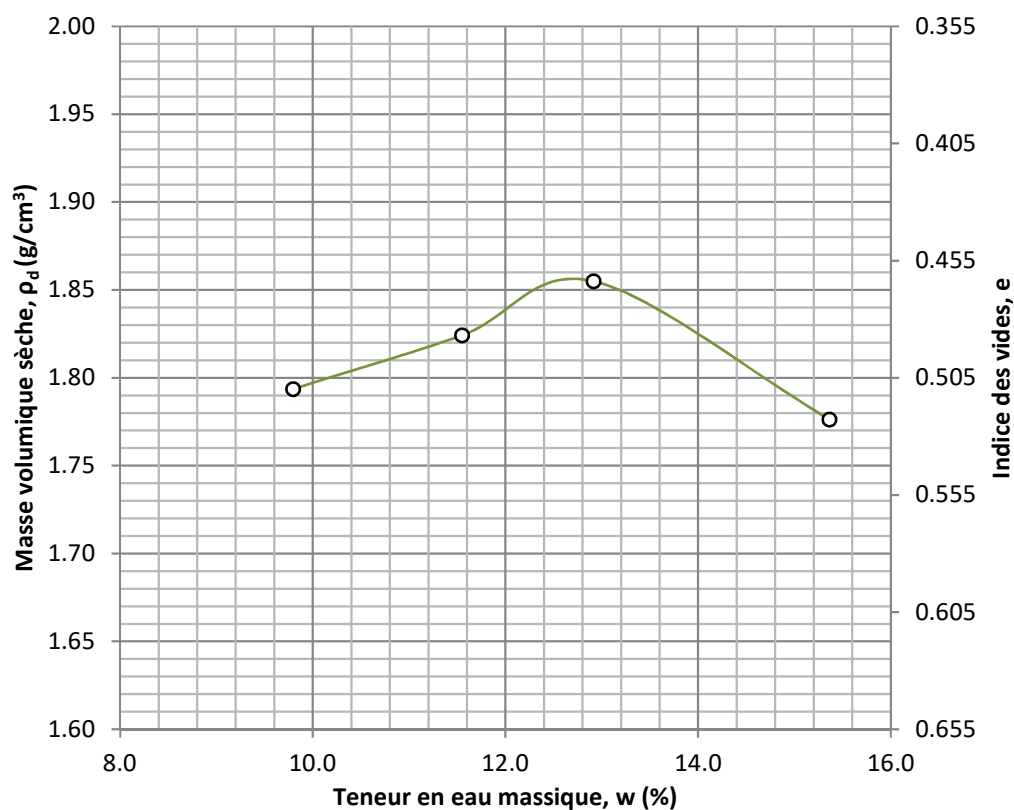


Figure A1-1 : Résultats d'essai Proctor modifié

Paramètres de résistance en cisaillement

Tableau A1-9 : Essais de cisaillement direct

Contrainte effective verticale σ'_v (kPa)	Force de cisaillement (kN)	Aire de la surface (cm ²)	Contraintes de cisaillement maximal τ_{\max} (kPa)	Angle de frottement (°)
0	0	0	0	34.7
50	0.129812	35.36	36.7115385	
100	0.258813	35.36	73.1937217	
200	0.511604	35.36	144.684389	
300	0.737183	35.36	208.479355	
400	0.966004	35.36	273.191176	

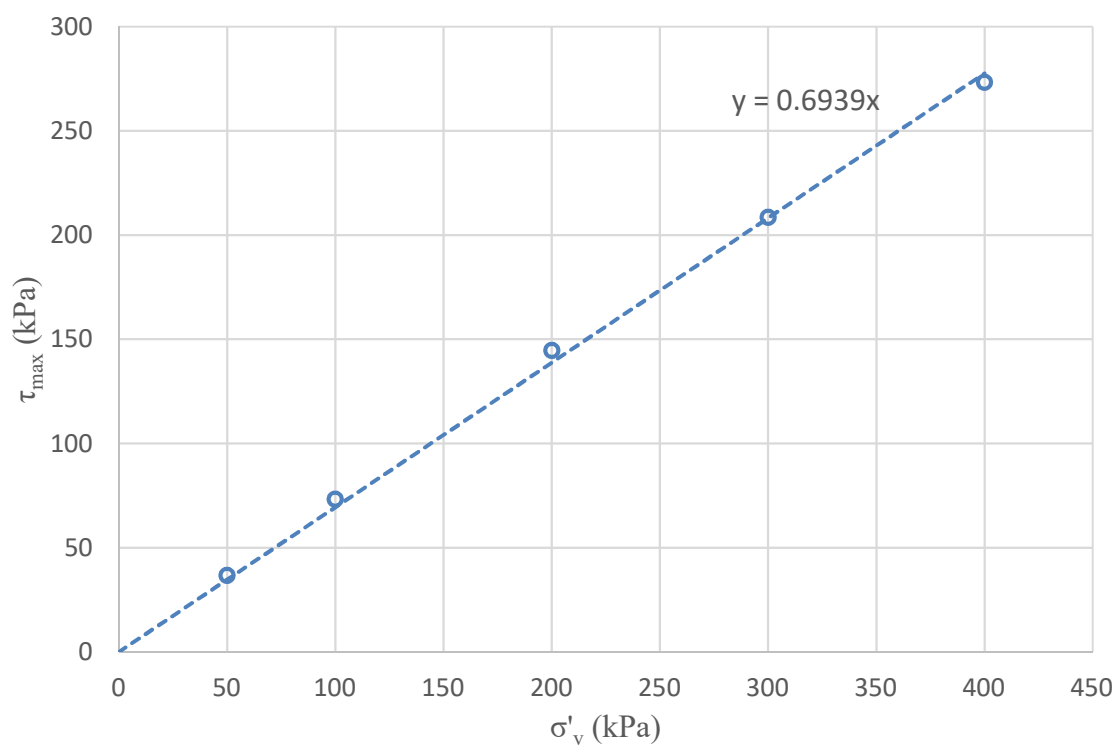


Figure A1-2 : Courbe de la résistance en cisaillement

ANNEXE 2 – PHOTOS DE L'APPAREIL CPT EN LABORATOIRE



Figure A2-1 : Installation des capteurs de pression au bas et sur le côté de la cellule



Figure A2-2 : Installation de la membrane semi-flexible dans la cellule



Figure A2-3 : Installation du géotextile sur les parois, le bas et le haut de la cellule pour faciliter le drainage



Figure A2-4 : Déposition des résidus miniers dans la cellule



Figure A2-5 : Installation du géotextile sur les résidus et retrait de l'eau en surface



Figure A2-6 : Mise en position de la cellule en dessous du bras de levier

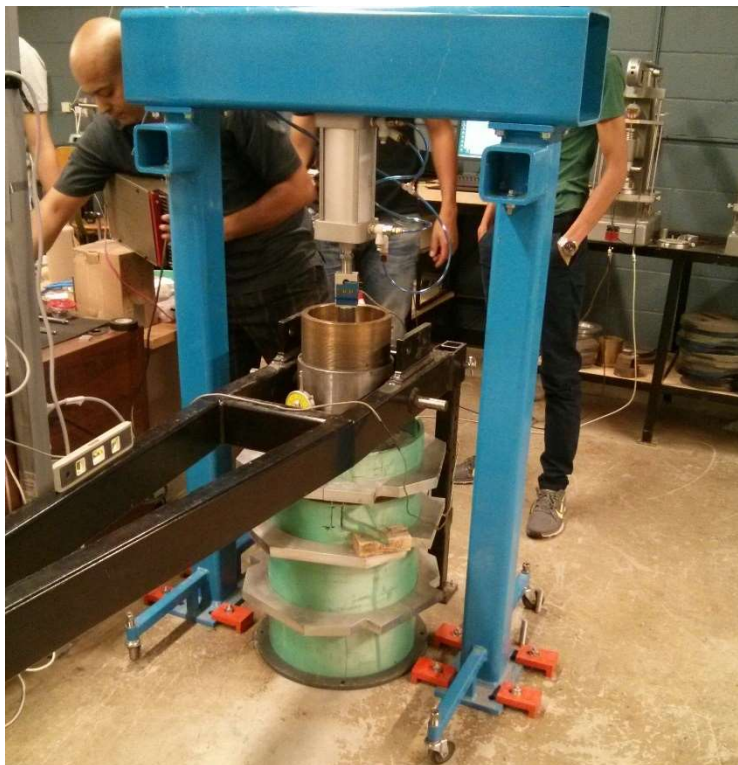


Figure A2-7 : Assemblage final de l'appareil avec le cône dans l'échantillon



Figure A2-8 : Vue de près du haut de la cellule instrumentée avec le cône dans la cellule

ANNEXE 3 – RÉSULTATS DE PÉNÉTRATION AU CÔNE EN LABORATOIRE

Processus de consolidation

Tableau A3-1 : Données durant la consolidation des résidus avant l'essai CPT

Contraintes verticales visées (kPa)	Date de lectures du déplacement vertical de la plaque	Mesure du déplacement vertical sur le cadran	Déplacement mesuré sur l'indicateur à cadran	Différence entre les lectures	Date de l'essai CPT
20	08-11-2016	10 :45	39.8	-	11-11-2016
	08-11-2016	11 :00	61.2	21.4	
	08-11-2016	13 :00	69.88	8.7	
	08-11-2016	20 :00	70.65	0.8	
	09-11-2016	8 :30	71.085	0.4	
	10-11-2016	10 :00	71.125	0.0	
40	13-12-2016	16 :15	43.1	-	19-12-2016
	13-12-2016	20 :45	71.32	28.2	
	14-12-2016	10 :30	72.26	0.9	
	14-12-2016	17 :00	72.41	0.1	
	15-12-2016	11 :15	72.42	0.0	
60	16-01-2017	12 :15	47.58	-	20-01-2017
	16-01-2017	16 :30	74.94	27.4	
	16-01-2017	20 :30	77.63	2.7	
	17-01-2017	17 :00	78.8	1.2	
	18-01-2017	10 :00	78.82	0.0	
70	06-02-2017	12 :30	31.02	-	10-02-2017
	06-02-2017	13 :00	55.01	24.0	
	06-02-2017	13 :45	62.57	7.6	
	07-02-2017	12 :30	75.57	13.0	
	08-02-2017	16 :00	75.6	0.0	
100	11-03-2017	12 :45	42.2	-	15-03-2017
	11-03-2017	14 :30	79.01	36.8	
	12-03-2017	10 :00	79.07	0.1	
	12-03-2017	14 :45	79.17	0.1	
	12-03-2017	20 :30	79.19	0.0	
	13-03-2017	9 :00	79.19	0.0	

ANNEXE 4 – DONNÉES DE TERRAIN – SCPT16-67

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn

z (m)	Élév. (m)	q _c (kPa)	q _t (kPa)	f _s (kPa)	u (m)	u (kPa)	σ _{vo} (kPa)	u ₀ (kPa)	σ' _{vo} (kPa)	Q _t	F _r (%)	I _c	n	Q _{tn}
3.70	347.37	6755.83	6739.52	111.57	-8.32	-81.62	75.70	22.56	53.14	125.40	1.67	1.99	0.64	99.58
3.75	347.32	7025.53	7009.55	115.95	-8.15	-79.95	76.73	23.05	53.67	129.17	1.67	1.98	0.63	102.74
3.80	347.27	7137.68	7122.03	111.98	-7.98	-78.28	77.75	23.54	54.20	129.96	1.59	1.96	0.63	103.33
3.85	347.22	6854.63	6838.79	109.52	-8.08	-79.26	78.77	24.03	54.74	123.50	1.62	1.99	0.63	99.05
3.90	347.17	6687.16	6671.57	104.92	-7.95	-77.99	79.79	24.53	55.27	119.27	1.59	1.99	0.64	96.12
3.95	347.12	6619.26	6603.85	67.61	-7.86	-77.11	80.82	25.02	55.80	116.90	1.04	1.87	0.59	92.03
4.00	347.07	6580.35	6565.15	63.35	-7.75	-76.03	81.84	25.51	56.33	115.09	0.98	1.86	0.59	90.74
4.05	347.02	6264.31	6260.58	70.26	-1.90	-18.64	82.86	26.00	56.87	108.64	1.14	1.92	0.61	87.16
4.10	346.97	5948.26	5935.73	79.21	-6.39	-62.69	83.89	26.49	57.40	101.95	1.35	1.99	0.64	83.35
4.15	346.92	6173.32	6158.75	95.64	-7.43	-72.89	84.91	26.98	57.93	104.85	1.57	2.03	0.65	86.67
4.20	346.87	5987.55	5973.55	104.38	-7.14	-70.04	85.93	27.47	58.46	100.71	1.77	2.08	0.67	84.36
4.25	346.82	6090.93	6077.11	103.06	-7.05	-69.16	86.96	27.96	59.00	101.53	1.72	2.06	0.67	85.12
4.30	346.77	6470.49	6456.41	104.59	-7.18	-70.44	87.98	28.45	59.53	106.98	1.64	2.03	0.65	89.43
4.35	346.72	6794.74	6780.45	107.14	-7.29	-71.51	89.00	28.94	60.06	111.41	1.60	2.01	0.65	93.07
4.40	346.67	6836.32	6821.85	108.54	-7.38	-72.40	90.02	29.43	60.59	111.10	1.61	2.02	0.65	93.16
4.45	346.62	7003.40	6988.91	111.16	-7.39	-72.50	91.05	29.92	61.13	112.85	1.61	2.01	0.65	94.85
4.50	346.57	7356.64	7341.93	112.28	-7.50	-73.58	92.07	30.41	61.66	117.58	1.55	1.99	0.64	98.69
4.55	346.52	7128.91	7113.99	112.41	-7.61	-74.65	93.09	30.90	62.19	112.89	1.60	2.01	0.65	95.45
4.60	346.47	6264.50	6249.52	108.03	-7.64	-74.95	94.12	31.39	62.72	98.13	1.76	2.08	0.67	84.30
4.65	346.42	5239.87	5224.67	93.52	-7.75	-76.03	95.14	31.88	63.26	81.09	1.82	2.15	0.70	70.73
4.70	346.37	4883.96	4868.72	83.51	-7.77	-76.22	96.16	32.37	63.79	74.82	1.75	2.17	0.71	65.58
4.75	346.32	5167.77	5153.48	79.50	-7.29	-71.51	97.19	32.86	64.32	78.61	1.57	2.12	0.69	68.53
4.80	346.27	5403.52	5389.87	83.89	-6.96	-68.28	98.21	33.35	64.85	81.59	1.59	2.11	0.69	71.21
4.85	346.22	5576.71	5561.63	90.13	-7.69	-75.44	99.23	33.84	65.39	83.54	1.65	2.11	0.69	73.16
4.90	346.17	5648.42	5633.64	93.59	-7.54	-73.97	100.25	34.34	65.92	83.94	1.69	2.12	0.69	73.77

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

4.95	346.12	5411.91	5397.13	74.58	-7.54	-73.97	101.28	34.83	66.45	79.69	1.41	2.08	0.68	69.82
5.00	346.07	5100.25	5085.21	55.57	-7.67	-75.24	102.30	35.32	66.98	74.39	1.12	2.04	0.66	64.93
5.05	346.02	4720.69	4706.79	63.76	-7.09	-69.55	103.32	35.81	67.52	68.18	1.38	2.13	0.69	60.48
5.10	345.97	4262.92	4248.25	63.87	-7.48	-73.38	104.35	36.30	68.05	60.90	1.54	2.20	0.72	54.69
5.15	345.92	3125.38	3110.26	28.50	-7.71	-75.64	105.37	36.79	68.58	43.81	0.95	2.19	0.72	39.38
5.20	345.87	2063.37	2048.13	18.03	-7.77	-76.22	106.39	37.28	69.11	28.09	0.93	2.34	0.78	25.88
5.25	345.82	1553.35	1538.47	13.47	-7.59	-74.46	107.42	37.77	69.65	20.55	0.94	2.47	0.82	19.28
5.30	345.77	1371.00	1360.33	13.91	-5.44	-53.37	108.44	38.26	70.18	17.84	1.11	2.55	0.86	16.97
5.35	345.72	1274.87	1278.58	11.59	1.89	18.54	109.46	38.75	70.71	16.53	0.99	2.56	0.86	15.75
5.40	345.67	1346.21	1349.43	12.59	1.64	16.09	110.48	39.24	71.24	17.39	1.02	2.54	0.86	16.56
5.45	345.62	1264.95	1268.71	13.26	1.92	18.84	111.51	39.73	71.78	16.12	1.15	2.60	0.88	15.47
5.50	345.57	1377.87	1381.60	12.31	1.90	18.64	112.53	40.22	72.31	17.55	0.97	2.53	0.85	16.72
5.55	345.52	1420.97	1423.97	12.33	1.53	15.01	113.55	40.71	72.84	17.99	0.94	2.52	0.85	17.13
5.60	345.47	1335.14	1338.57	12.73	1.75	17.17	114.58	41.20	73.37	16.68	1.04	2.57	0.86	15.99
5.65	345.42	1379.39	1385.55	14.14	3.14	30.80	115.60	41.69	73.91	17.18	1.11	2.57	0.87	16.50
5.70	345.37	1414.11	1424.03	13.04	5.06	49.64	116.62	42.18	74.44	17.56	1.00	2.54	0.85	16.82
5.75	345.32	1457.21	1461.25	13.10	2.06	20.21	117.65	42.67	74.97	17.92	0.98	2.52	0.85	17.16
5.80	345.27	1236.34	1239.28	12.82	1.50	14.72	118.67	43.16	75.50	14.84	1.14	2.63	0.89	14.39
5.85	345.22	1232.91	1237.24	11.28	2.21	21.68	119.69	43.65	76.04	14.70	1.01	2.61	0.88	14.23
5.90	345.17	1203.92	1209.39	11.56	2.79	27.37	120.71	44.15	76.57	14.22	1.06	2.63	0.89	13.81
5.95	345.12	1098.63	1104.63	11.31	3.06	30.02	121.74	44.64	77.10	12.75	1.15	2.69	0.91	12.46
6.00	345.07	1065.44	1071.34	11.07	3.01	29.53	122.76	45.13	77.63	12.22	1.17	2.71	0.92	11.98
6.05	345.02	1155.85	1162.81	12.21	3.55	34.83	123.78	45.62	78.17	13.29	1.17	2.68	0.91	13.00
6.10	344.97	1189.80	1193.37	13.99	1.82	17.85	124.81	46.11	78.70	13.58	1.31	2.69	0.92	13.30
6.15	344.92	1254.65	1260.14	14.69	2.80	27.47	125.83	46.60	79.23	14.32	1.29	2.67	0.91	14.01
6.20	344.87	1245.88	1249.86	14.93	2.03	19.91	126.85	47.09	79.76	14.08	1.33	2.68	0.91	13.80
6.25	344.82	1153.95	1157.09	13.38	1.60	15.70	127.88	47.58	80.30	12.82	1.30	2.71	0.92	12.60
6.30	344.77	1074.98	1078.76	12.48	1.93	18.93	128.90	48.07	80.83	11.75	1.31	2.75	0.94	11.60
6.35	344.72	1078.80	1084.78	12.82	3.05	29.92	129.92	48.56	81.36	11.74	1.34	2.75	0.94	11.59

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

6.40	344.67	1132.58	1138.89	13.12	3.22	31.59	130.94	49.05	81.89	12.31	1.30	2.73	0.93	12.14
6.45	344.62	1180.27	1186.72	12.93	3.29	32.27	131.97	49.54	82.43	12.80	1.23	2.70	0.92	12.60
6.50	344.57	1224.52	1230.44	13.39	3.02	29.63	132.99	50.03	82.96	13.23	1.22	2.69	0.92	13.02
6.55	344.52	1265.34	1273.60	15.27	4.21	41.30	134.01	50.52	83.49	13.65	1.34	2.70	0.92	13.45
6.60	344.47	1196.67	1204.06	14.92	3.77	36.98	135.04	51.01	84.02	12.72	1.40	2.73	0.93	12.57
6.65	344.42	1131.82	1138.43	13.32	3.37	33.06	136.06	51.50	84.56	11.85	1.33	2.75	0.94	11.73
6.70	344.37	1086.43	1093.78	13.25	3.75	36.79	137.08	51.99	85.09	11.24	1.38	2.78	0.95	11.15
6.75	344.32	1037.22	1044.18	12.81	3.55	34.83	138.11	52.48	85.62	10.58	1.41	2.80	0.96	10.52
6.80	344.27	971.60	979.58	11.55	4.07	39.93	139.13	52.97	86.15	9.76	1.37	2.83	0.97	9.71
6.85	344.22	883.48	891.64	13.38	4.16	40.81	140.15	53.46	86.69	8.67	1.78	2.93	1.00	8.67
6.90	344.17	835.42	845.18	13.55	4.98	48.85	141.17	53.96	87.22	8.07	1.92	2.97	1.00	8.07
6.95	344.12	1187.52	1199.21	11.89	5.96	58.47	142.20	54.45	87.75	12.05	1.13	2.71	0.92	11.93
7.00	344.07	1233.29	1238.74	19.65	2.78	27.27	143.22	54.94	88.28	12.41	1.79	2.80	0.96	12.35
7.05	344.02	1329.80	1335.82	18.68	3.07	30.12	144.24	55.43	88.82	13.42	1.57	2.74	0.94	13.32
7.10	343.97	1355.74	1356.58	13.61	0.43	4.22	145.27	55.92	89.35	13.56	1.12	2.66	0.91	13.42
7.15	343.92	1008.99	1007.87	10.85	-0.57	-5.59	146.29	56.41	89.88	9.59	1.26	2.82	0.97	9.55
7.20	343.87	695.04	700.31	9.76	2.69	26.39	147.31	56.90	90.41	6.12	1.77	3.06	1.00	6.12
7.25	343.82	614.17	629.37	8.96	7.75	76.03	148.34	57.39	90.95	5.29	1.86	3.12	1.00	5.29
7.30	343.77	550.84	567.10	8.34	8.29	81.32	149.36	57.88	91.48	4.57	2.00	3.20	1.00	4.57
7.35	343.72	509.64	527.13	7.73	8.92	87.51	150.38	58.37	92.01	4.09	2.05	3.24	1.00	4.09
7.40	343.67	468.83	487.58	7.59	9.56	93.78	151.40	58.86	92.54	3.63	2.26	3.31	1.00	3.63
7.45	343.62	456.62	476.95	7.74	10.37	101.73	152.43	59.35	93.08	3.49	2.38	3.33	1.00	3.49
7.50	343.57	442.12	461.49	8.25	9.88	96.92	153.45	59.84	93.61	3.29	2.68	3.38	1.00	3.29
7.55	343.52	446.32	466.42	7.79	10.25	100.55	154.47	60.33	94.14	3.31	2.50	3.36	1.00	3.31
7.60	343.47	551.99	572.13	8.03	10.27	100.75	155.50	60.82	94.67	4.40	1.93	3.20	1.00	4.40
7.65	343.42	492.86	511.94	8.02	9.73	95.45	156.52	61.31	95.21	3.73	2.26	3.30	1.00	3.73
7.70	343.37	555.80	575.92	3.92	10.26	100.65	157.54	61.80	95.74	4.37	0.94	3.07	1.00	4.37
7.75	343.32	468.44	486.36	5.42	9.14	89.66	158.57	62.29	96.27	3.40	1.65	3.27	1.00	3.40
7.80	343.27	331.50	359.09	6.70	14.07	138.03	159.59	62.78	96.80	2.06	3.36	3.61	1.00	2.06

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

7.85	343.22	444.03	467.21	4.75	11.82	115.95	160.61	63.27	97.34	3.15	1.55	3.29	1.00	3.15
7.90	343.17	426.48	448.09	4.64	11.02	108.11	161.63	63.77	97.87	2.93	1.62	3.33	1.00	2.93
7.95	343.12	361.25	388.74	6.36	14.02	137.54	162.66	64.26	98.40	2.30	2.81	3.53	1.00	2.30
8.00	343.07	369.26	396.03	5.47	13.65	133.91	163.68	64.75	98.93	2.35	2.35	3.48	1.00	2.35
8.05	343.02	489.81	506.05	5.83	8.28	81.23	164.70	65.24	99.47	3.43	1.71	3.27	1.00	3.43
8.10	342.97	411.22	432.22	6.92	10.71	105.07	165.73	65.73	100.00	2.66	2.60	3.46	1.00	2.66
8.15	342.92	407.41	429.90	7.52	11.47	112.52	166.75	66.22	100.53	2.62	2.86	3.48	1.00	2.62
8.20	342.87	457.00	479.59	7.39	11.52	113.01	167.77	66.71	101.06	3.09	2.37	3.38	1.00	3.09
8.25	342.82	484.85	507.67	6.34	11.64	114.19	168.80	67.20	101.60	3.34	1.87	3.30	1.00	3.34
8.30	342.77	503.54	526.46	7.29	11.69	114.68	169.82	67.69	102.13	3.49	2.05	3.30	1.00	3.49
8.35	342.72	440.60	465.44	7.28	12.67	124.29	170.84	68.18	102.66	2.87	2.47	3.42	1.00	2.87
8.40	342.67	465.77	489.63	7.48	12.17	119.39	171.86	68.67	103.19	3.08	2.35	3.38	1.00	3.08
8.45	342.62	415.04	439.08	7.91	12.26	120.27	172.89	69.16	103.73	2.57	2.97	3.50	1.00	2.57
8.50	342.57	419.24	445.26	7.55	13.27	130.18	173.91	69.65	104.26	2.60	2.78	3.48	1.00	2.60
8.55	342.52	461.96	486.82	6.90	12.68	124.39	174.93	70.14	104.79	2.98	2.21	3.38	1.00	2.98
8.60	342.47	399.40	425.11	6.80	13.11	128.61	175.96	70.63	105.32	2.37	2.73	3.51	1.00	2.37
8.65	342.42	333.40	360.68	5.62	13.91	136.46	176.98	71.12	105.86	1.74	3.06	3.65	1.00	1.74
8.70	342.37	388.34	415.79	5.55	14.00	137.34	178.00	71.61	106.39	2.24	2.34	3.50	1.00	2.24
8.75	342.32	408.55	437.30	5.49	14.66	143.81	179.03	72.10	106.92	2.42	2.12	3.45	1.00	2.42
8.80	342.27	465.39	493.63	5.05	14.40	141.26	180.05	72.59	107.45	2.92	1.61	3.33	1.00	2.92
8.85	342.22	474.93	502.09	5.02	13.85	135.87	181.07	73.08	107.99	2.97	1.56	3.31	1.00	2.97
8.90	342.17	430.68	458.84	5.88	14.36	140.87	182.09	73.58	108.52	2.55	2.13	3.43	1.00	2.55
8.95	342.12	400.16	427.91	6.00	14.15	138.81	183.12	74.07	109.05	2.24	2.45	3.51	1.00	2.24
9.00	342.07	434.88	461.02	5.46	13.33	130.77	184.14	74.56	109.58	2.53	1.97	3.42	1.00	2.53
9.05	342.02	589.75	606.34	6.17	8.46	82.99	185.16	75.05	110.12	3.82	1.46	3.20	1.00	3.82
9.10	341.97	453.95	477.60	6.11	12.06	118.31	186.19	75.54	110.65	2.63	2.10	3.42	1.00	2.63
9.15	341.92	462.34	488.14	6.82	13.16	129.10	187.21	76.03	111.18	2.71	2.27	3.42	1.00	2.71
9.20	341.87	440.98	467.37	6.91	13.46	132.04	188.23	76.52	111.71	2.50	2.48	3.47	1.00	2.50
9.25	341.82	486.75	513.99	7.22	13.89	136.26	189.26	77.01	112.25	2.89	2.22	3.39	1.00	2.89

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

9.30	341.77	497.44	524.40	7.11	13.75	134.89	190.28	77.50	112.78	2.96	2.13	3.37	1.00	2.96
9.35	341.72	480.65	508.22	6.96	14.06	137.93	191.30	77.99	113.31	2.80	2.20	3.40	1.00	2.80
9.40	341.67	456.62	484.95	6.85	14.45	141.75	192.32	78.48	113.84	2.57	2.34	3.45	1.00	2.57
9.45	341.62	466.16	495.67	6.43	15.05	147.64	193.35	78.97	114.38	2.64	2.13	3.42	1.00	2.64
9.50	341.57	455.09	484.52	6.23	15.01	147.25	194.37	79.46	114.91	2.53	2.15	3.44	1.00	2.53
9.55	341.52	440.22	471.12	6.35	15.76	154.61	195.39	79.95	115.44	2.39	2.30	3.47	1.00	2.39
9.60	341.47	440.60	470.15	5.68	15.07	147.84	196.42	80.44	115.97	2.36	2.08	3.46	1.00	2.36
9.65	341.42	444.79	475.89	7.97	15.86	155.59	197.44	80.93	116.51	2.39	2.86	3.52	1.00	2.39
9.70	341.37	558.85	591.89	7.90	16.85	165.30	198.46	81.42	117.04	3.36	2.01	3.31	1.00	3.36
9.75	341.32	856.40	876.36	8.24	10.18	99.87	199.49	81.91	117.57	5.76	1.22	3.01	1.00	5.76
9.80	341.27	680.16	704.20	8.49	12.26	120.27	200.51	82.40	118.10	4.26	1.69	3.19	1.00	4.26
9.85	341.22	624.85	652.30	7.58	14.00	137.34	201.53	82.89	118.64	3.80	1.68	3.23	1.00	3.80
9.90	341.17	605.39	633.27	6.86	14.22	139.50	202.55	83.39	119.17	3.61	1.59	3.24	1.00	3.61
9.95	341.12	590.51	620.12	6.18	15.10	148.13	203.58	83.88	119.70	3.48	1.48	3.24	1.00	3.48
10.00	341.07	576.40	606.40	7.21	15.30	150.09	204.60	84.37	120.23	3.34	1.80	3.29	1.00	3.34
10.05	341.02	790.40	814.52	6.89	12.30	120.66	205.62	84.86	120.77	5.04	1.13	3.05	1.00	5.04
10.10	340.97	645.07	667.80	7.74	11.59	113.70	206.65	85.35	121.30	3.80	1.68	3.23	1.00	3.80
10.15	340.92	596.62	625.54	7.75	14.75	144.70	207.67	85.84	121.83	3.43	1.86	3.29	1.00	3.43
10.20	340.87	669.10	697.75	7.19	14.61	143.32	208.69	86.33	122.36	4.00	1.47	3.19	1.00	4.00
10.25	340.82	677.87	704.71	8.18	13.69	134.30	209.72	86.82	122.90	4.03	1.65	3.21	1.00	4.03
10.30	340.77	664.52	693.87	7.95	14.97	146.86	210.74	87.31	123.43	3.91	1.65	3.22	1.00	3.91
10.35	340.72	659.56	686.78	8.29	13.88	136.16	211.76	87.80	123.96	3.83	1.74	3.24	1.00	3.83
10.40	340.67	614.17	644.03	7.92	15.23	149.41	212.78	88.29	124.49	3.46	1.84	3.28	1.00	3.46
10.45	340.62	620.65	650.96	7.64	15.46	151.66	213.81	88.78	125.03	3.50	1.75	3.27	1.00	3.50
10.50	340.57	614.93	646.19	7.48	15.94	156.37	214.83	89.27	125.56	3.44	1.73	3.28	1.00	3.44
10.55	340.52	601.58	632.62	7.16	15.83	155.29	215.85	89.76	126.09	3.31	1.72	3.29	1.00	3.31
10.60	340.47	583.27	614.90	6.89	16.13	158.24	216.88	90.25	126.62	3.14	1.73	3.31	1.00	3.14
10.65	340.42	577.16	609.77	7.36	16.63	163.14	217.90	90.74	127.16	3.08	1.88	3.33	1.00	3.08
10.70	340.37	608.06	641.22	7.45	16.91	165.89	218.92	91.23	127.69	3.31	1.76	3.29	1.00	3.31

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

10.75	340.32	716.40	747.24	6.55	15.73	154.31	219.95	91.72	128.22	4.11	1.24	3.14	1.00	4.11
10.80	340.27	683.59	713.87	6.54	15.44	151.47	220.97	92.21	128.75	3.83	1.33	3.18	1.00	3.83
10.85	340.22	651.55	683.59	6.79	16.34	160.30	221.99	92.70	129.29	3.57	1.47	3.23	1.00	3.57
10.90	340.17	627.90	660.72	6.99	16.74	164.22	223.01	93.20	129.82	3.37	1.60	3.27	1.00	3.37
10.95	340.12	627.90	659.55	6.15	16.14	158.33	224.04	93.69	130.35	3.34	1.41	3.25	1.00	3.34
11.00	340.07	656.51	688.61	7.54	16.37	160.59	225.06	94.18	130.88	3.54	1.63	3.25	1.00	3.54
11.05	340.02	716.40	743.13	7.54	13.63	133.71	226.08	94.67	131.42	3.93	1.46	3.19	1.00	3.93
11.10	339.97	712.59	740.49	6.87	14.23	139.60	227.11	95.16	131.95	3.89	1.34	3.18	1.00	3.89
11.15	339.92	660.71	692.14	6.49	16.03	157.25	228.13	95.65	132.48	3.50	1.40	3.23	1.00	3.50
11.20	339.87	634.77	669.38	6.97	17.65	173.15	229.15	96.14	133.01	3.31	1.58	3.27	1.00	3.31
11.25	339.82	640.49	674.73	7.28	17.46	171.28	230.18	96.63	133.55	3.33	1.64	3.28	1.00	3.33
11.30	339.77	650.02	683.86	8.06	17.26	169.32	231.20	97.12	134.08	3.38	1.78	3.29	1.00	3.38
11.35	339.72	686.26	719.24	7.85	16.82	165.00	232.22	97.61	134.61	3.62	1.61	3.24	1.00	3.62
11.40	339.67	707.25	739.68	8.26	16.54	162.26	233.24	98.10	135.14	3.75	1.63	3.23	1.00	3.75
11.45	339.62	757.60	791.46	8.77	17.27	169.42	234.27	98.59	135.68	4.11	1.57	3.19	1.00	4.11
11.50	339.57	802.23	833.51	8.78	15.95	156.47	235.29	99.08	136.21	4.39	1.47	3.15	1.00	4.39
11.55	339.52	780.11	811.68	9.80	16.10	157.94	236.31	99.57	136.74	4.21	1.70	3.19	1.00	4.21
11.60	339.47	767.90	800.55	13.45	16.65	163.34	237.34	100.06	137.27	4.10	2.39	3.27	1.00	4.10
11.65	339.42	1531.60	1567.39	10.12	18.25	179.03	238.36	100.55	137.81	9.64	0.76	2.72	0.95	9.78
11.70	339.37	1505.28	1517.71	9.27	6.34	62.20	239.38	101.04	138.34	9.24	0.72	2.73	0.96	9.37
11.75	339.32	1257.32	1285.05	10.13	14.14	138.71	240.41	101.53	138.87	7.52	0.97	2.86	1.00	7.52
11.80	339.27	1165.77	1196.71	9.07	15.78	154.80	241.43	102.02	139.40	6.85	0.95	2.89	1.00	6.85
11.85	339.22	1051.71	1078.81	9.20	13.82	135.57	242.45	102.51	139.94	5.98	1.10	2.97	1.00	5.98
11.90	339.17	1182.17	1214.72	10.36	16.60	162.85	243.47	103.01	140.47	6.91	1.07	2.91	1.00	6.91
11.95	339.12	1283.65	1315.83	9.97	16.41	160.98	244.50	103.50	141.00	7.60	0.93	2.85	1.00	7.60
12.00	339.07	1430.51	1458.67	11.37	14.36	140.87	245.52	103.99	141.53	8.57	0.94	2.80	0.99	8.61
12.05	339.02	1536.56	1557.01	11.89	10.43	102.32	246.54	104.48	142.07	9.22	0.91	2.77	0.98	9.30
12.10	338.97	1397.70	1421.09	11.17	11.93	117.03	247.57	104.97	142.60	8.23	0.95	2.82	1.00	8.24
12.15	338.92	1333.24	1358.04	9.91	12.65	124.10	248.59	105.46	143.13	7.75	0.89	2.83	1.00	7.75

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

12.20	338.87	1308.82	1338.72	11.80	15.25	149.60	249.61	105.95	143.66	7.58	1.08	2.88	1.00	7.58
12.25	338.82	1307.68	1338.58	12.69	15.76	154.61	250.64	106.44	144.20	7.54	1.17	2.89	1.00	7.54
12.30	338.77	1575.85	1603.22	11.93	13.96	136.95	251.66	106.93	144.73	9.34	0.88	2.76	0.97	9.43
12.35	338.72	1596.45	1621.63	14.65	12.84	125.96	252.68	107.42	145.26	9.42	1.07	2.79	0.99	9.47
12.40	338.67	1529.31	1557.53	16.16	14.39	141.17	253.70	107.91	145.79	8.94	1.24	2.84	1.00	8.94
12.45	338.62	1681.52	1704.87	15.18	11.91	116.84	254.73	108.40	146.33	9.91	1.05	2.77	0.98	10.00
12.50	338.57	1649.47	1669.71	18.94	10.32	101.24	255.75	108.89	146.86	9.63	1.34	2.83	1.00	9.63
12.55	338.52	1704.03	1728.03	17.76	12.24	120.07	256.77	109.38	147.39	9.98	1.21	2.79	0.99	10.03
12.60	338.47	2042.01	2064.79	13.09	11.62	113.99	257.80	109.87	147.92	12.22	0.72	2.62	0.92	12.60
12.65	338.42	1596.45	1604.43	12.09	4.07	39.93	258.82	110.36	148.46	9.06	0.90	2.77	0.98	9.13
12.70	338.37	1215.74	1246.43	13.65	15.65	153.53	259.84	110.85	148.99	6.62	1.38	2.98	1.00	6.62
12.75	338.32	1321.03	1353.70	10.57	16.66	163.43	260.87	111.34	149.52	7.31	0.97	2.87	1.00	7.31
12.80	338.27	1307.30	1333.69	9.48	13.46	132.04	261.89	111.83	150.05	7.14	0.88	2.86	1.00	7.14
12.85	338.22	1063.92	1096.84	9.96	16.79	164.71	262.91	112.32	150.59	5.54	1.19	3.02	1.00	5.54
12.90	338.17	1119.61	1154.45	5.90	17.77	174.32	263.93	112.82	151.12	5.89	0.66	2.89	1.00	5.89
12.95	338.12	1211.17	1241.76	6.07	15.60	153.04	264.96	113.31	151.65	6.44	0.62	2.85	1.00	6.44
13.00	338.07	873.57	915.81	7.44	21.54	211.31	265.98	113.80	152.18	4.27	1.14	3.11	1.00	4.27
13.05	338.02	1127.24	1161.14	5.94	17.29	169.61	267.00	114.29	152.72	5.85	0.66	2.90	1.00	5.85
13.10	337.97	1364.14	1393.96	6.36	15.21	149.21	268.03	114.78	153.25	7.35	0.56	2.78	0.99	7.39
13.15	337.92	1418.69	1457.57	7.27	19.83	194.53	269.05	115.27	153.78	7.73	0.61	2.77	0.98	7.79
13.20	337.87	1889.80	1928.57	7.44	19.77	193.94	270.07	115.76	154.31	10.75	0.45	2.59	0.91	11.16
13.25	337.82	1748.66	1784.80	11.40	18.43	180.80	271.10	116.25	154.85	9.78	0.75	2.71	0.96	9.95
13.30	337.77	1860.05	1898.85	11.31	19.79	194.14	272.12	116.74	155.38	10.47	0.70	2.67	0.95	10.73
13.35	337.72	2113.72	2143.39	14.19	15.13	148.43	273.14	117.23	155.91	12.00	0.76	2.63	0.93	12.37
13.40	337.67	1798.25	1826.07	15.53	14.19	139.20	274.16	117.72	156.44	9.92	1.00	2.76	0.98	10.01
13.45	337.62	2328.11	2358.97	11.20	15.74	154.41	275.19	118.21	156.98	13.27	0.54	2.53	0.89	13.93
13.50	337.57	2195.36	2210.32	10.99	7.63	74.85	276.21	118.70	157.51	12.28	0.57	2.57	0.91	12.80
13.55	337.52	1769.26	1799.50	7.49	15.42	151.27	277.23	119.19	158.04	9.63	0.49	2.65	0.94	9.91
13.60	337.47	1522.45	1551.90	5.80	15.02	147.35	278.26	119.68	158.57	8.03	0.45	2.71	0.96	8.17

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

13.65	337.42	1217.65	1261.95	5.56	22.59	221.61	279.28	120.17	159.11	6.18	0.57	2.85	1.00	6.18
13.70	337.37	893.40	940.19	5.35	23.86	234.07	280.30	120.66	159.64	4.13	0.81	3.07	1.00	4.13
13.75	337.32	978.85	1022.16	2.93	22.09	216.70	281.33	121.15	160.17	4.63	0.40	2.92	1.00	4.63
13.80	337.27	906.75	949.81	5.22	21.96	215.43	282.35	121.64	160.70	4.15	0.78	3.06	1.00	4.15
13.85	337.22	678.63	728.81	4.92	25.59	251.04	283.37	122.13	161.24	2.76	1.10	3.28	1.00	2.76
13.90	337.17	834.66	876.70	6.41	21.44	210.33	284.39	122.63	161.77	3.66	1.08	3.17	1.00	3.66
13.95	337.12	833.51	878.53	6.99	22.96	225.24	285.42	123.12	162.30	3.65	1.18	3.18	1.00	3.65
14.00	337.07	973.13	1014.21	7.58	20.95	205.52	286.44	123.61	162.83	4.47	1.04	3.08	1.00	4.47
14.05	337.02	914.00	949.94	6.78	18.33	179.82	287.46	124.10	163.37	4.06	1.02	3.12	1.00	4.06
14.10	336.97	994.49	1027.59	4.89	16.88	165.59	288.49	124.59	163.90	4.51	0.66	3.00	1.00	4.51
14.15	336.92	899.89	941.34	8.06	21.14	207.38	289.51	125.08	164.43	3.96	1.24	3.16	1.00	3.96
14.20	336.87	1027.30	1072.69	2.85	23.15	227.10	290.53	125.57	164.96	4.74	0.36	2.90	1.00	4.74
14.25	336.82	1325.99	1355.54	3.18	15.07	147.84	291.56	126.06	165.50	6.43	0.30	2.75	0.98	6.49
14.30	336.77	790.40	839.64	4.79	25.11	246.33	292.58	126.55	166.03	3.29	0.88	3.17	1.00	3.29
14.35	336.72	805.66	855.52	5.45	25.43	249.47	293.60	127.04	166.56	3.37	0.97	3.18	1.00	3.37
14.40	336.67	914.38	957.40	4.73	21.94	215.23	294.62	127.53	167.09	3.97	0.71	3.07	1.00	3.97
14.45	336.62	859.45	903.39	5.66	22.41	219.84	295.65	128.02	167.63	3.63	0.93	3.14	1.00	3.63
14.50	336.57	790.79	838.71	6.47	24.44	239.76	296.67	128.51	168.16	3.22	1.19	3.23	1.00	3.22
14.55	336.52	849.15	895.09	7.61	23.43	229.85	297.69	129.00	168.69	3.54	1.27	3.21	1.00	3.54
14.60	336.47	918.96	964.20	8.24	23.07	226.32	298.72	129.49	169.22	3.93	1.24	3.16	1.00	3.93
14.65	336.42	837.71	875.28	6.31	19.16	187.96	299.74	129.98	169.76	3.39	1.10	3.20	1.00	3.39
14.70	336.37	858.69	901.44	4.88	21.80	213.86	300.76	130.47	170.29	3.53	0.81	3.13	1.00	3.53
14.75	336.32	1078.80	1127.37	3.55	24.77	242.99	301.79	130.96	170.82	4.83	0.43	2.91	1.00	4.83
14.80	336.27	851.06	900.88	5.09	25.41	249.27	302.81	131.45	171.35	3.49	0.85	3.15	1.00	3.49
14.85	336.22	796.89	849.32	4.54	26.74	262.32	303.83	131.94	171.89	3.17	0.83	3.18	1.00	3.17
14.90	336.17	886.92	931.45	3.26	22.71	222.79	304.85	132.44	172.42	3.63	0.52	3.06	1.00	3.63
14.95	336.12	756.07	805.82	4.85	25.37	248.88	305.88	132.93	172.95	2.89	0.97	3.24	1.00	2.89
15.00	336.07	608.06	661.32	6.25	27.16	266.44	306.90	133.42	173.48	2.04	1.76	3.48	1.00	2.04
15.05	336.02	829.32	868.18	4.83	19.82	194.43	307.92	133.91	174.02	3.22	0.86	3.18	1.00	3.22

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

15.10	335.97	1051.33	1093.17	3.27	21.34	209.35	308.95	134.40	174.55	4.49	0.42	2.94	1.00	4.49
15.15	335.92	1044.85	1090.13	4.52	23.09	226.51	309.97	134.89	175.08	4.46	0.58	2.99	1.00	4.46
15.20	335.87	908.28	960.05	6.28	26.40	258.98	310.99	135.38	175.61	3.70	0.97	3.14	1.00	3.70
15.25	335.82	1063.92	1113.73	8.82	25.40	249.17	312.02	135.87	176.15	4.55	1.10	3.08	1.00	4.55
15.30	335.77	1807.79	1849.34	8.71	21.19	207.87	313.04	136.36	176.68	8.70	0.57	2.71	0.97	8.84
15.35	335.72	1629.64	1666.39	7.23	18.74	183.84	314.06	136.85	177.21	7.63	0.53	2.76	0.99	7.68
15.40	335.67	1142.12	1179.41	8.91	19.02	186.59	315.08	137.34	177.74	4.86	1.03	3.04	1.00	4.86
15.45	335.62	879.29	927.02	5.93	24.34	238.78	316.11	137.83	178.28	3.43	0.97	3.17	1.00	3.43
15.50	335.57	844.96	892.57	5.90	24.28	238.19	317.13	138.32	178.81	3.22	1.03	3.21	1.00	3.22
15.55	335.52	772.48	824.30	7.03	26.43	259.28	318.15	138.81	179.34	2.82	1.39	3.31	1.00	2.82
15.60	335.47	824.74	874.96	7.55	25.61	251.23	319.18	139.30	179.87	3.09	1.36	3.27	1.00	3.09
15.65	335.42	865.17	914.13	6.30	24.97	244.96	320.20	139.79	180.41	3.29	1.06	3.20	1.00	3.29
15.70	335.37	883.10	931.98	4.98	24.93	244.56	321.22	140.28	180.94	3.38	0.82	3.15	1.00	3.38
15.75	335.32	801.09	852.39	5.31	26.16	256.63	322.25	140.77	181.47	2.92	1.00	3.24	1.00	2.92
15.80	335.27	808.33	860.76	5.42	26.74	262.32	323.27	141.26	182.00	2.95	1.01	3.24	1.00	2.95
15.85	335.22	822.45	874.51	4.91	26.55	260.46	324.29	141.75	182.54	3.01	0.89	3.21	1.00	3.01
15.90	335.17	822.83	875.46	6.27	26.84	263.30	325.31	142.25	183.07	3.01	1.14	3.25	1.00	3.01
15.95	335.12	794.60	848.60	5.45	27.54	270.17	326.34	142.74	183.60	2.84	1.04	3.26	1.00	2.84
16.00	335.07	848.01	898.32	6.44	25.66	251.72	327.36	143.23	184.13	3.10	1.13	3.24	1.00	3.10
16.05	335.02	893.40	937.24	6.91	22.36	219.35	328.38	143.72	184.67	3.30	1.14	3.22	1.00	3.30
16.10	334.97	831.60	880.50	6.24	24.94	244.66	329.41	144.21	185.20	2.98	1.13	3.26	1.00	2.98
16.15	334.92	825.12	877.34	6.91	26.63	261.24	330.43	144.70	185.73	2.94	1.26	3.28	1.00	2.94
16.20	334.87	851.82	905.72	5.52	27.49	269.68	331.45	145.19	186.26	3.08	0.96	3.21	1.00	3.08
16.25	334.82	892.64	941.62	6.73	24.98	245.05	332.48	145.68	186.80	3.26	1.10	3.22	1.00	3.26
16.30	334.77	765.61	819.43	7.36	27.45	269.28	333.50	146.17	187.33	2.59	1.52	3.36	1.00	2.59
16.35	334.72	775.53	830.41	7.47	27.99	274.58	334.52	146.66	187.86	2.64	1.51	3.35	1.00	2.64
16.40	334.67	844.19	898.60	5.79	27.75	272.23	335.54	147.15	188.39	2.99	1.03	3.24	1.00	2.99
16.45	334.62	895.69	950.87	8.19	28.14	276.05	336.57	147.64	188.93	3.25	1.33	3.25	1.00	3.25
16.50	334.57	1800.92	1859.71	16.59	29.98	294.10	337.59	148.13	189.46	8.03	1.09	2.86	1.00	8.03

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

16.55	334.52	4339.22	4380.02	33.42	20.81	204.15	338.61	148.62	189.99	21.27	0.83	2.43	0.87	23.14
16.60	334.47	4025.65	4059.96	57.79	17.50	171.68	339.64	149.11	190.52	19.53	1.55	2.60	0.93	20.37
16.65	334.42	2410.89	2448.18	64.67	19.02	186.59	340.66	149.60	191.06	11.03	3.07	2.97	1.00	11.03
16.70	334.37	2169.04	2208.86	45.80	20.31	199.24	341.68	150.09	191.59	9.75	2.45	2.96	1.00	9.75
16.75	334.32	3184.89	3214.07	27.54	14.88	145.97	342.71	150.58	192.12	14.95	0.96	2.59	0.93	15.61
16.80	334.27	2773.67	2800.96	25.03	13.92	136.56	343.73	151.07	192.65	12.75	1.02	2.66	0.96	13.08
16.85	334.22	2190.02	2244.04	32.09	27.55	270.27	344.75	151.56	193.19	9.83	1.69	2.87	1.00	9.83
16.90	334.17	1900.48	1955.74	36.00	28.18	276.45	345.77	152.06	193.72	8.31	2.24	2.99	1.00	8.31
16.95	334.12	2347.18	2388.75	18.73	21.20	207.97	346.80	152.55	194.25	10.51	0.92	2.72	0.98	10.63
17.00	334.07	2365.11	2391.01	13.62	13.21	129.59	347.82	153.04	194.78	10.49	0.67	2.66	0.96	10.76
17.05	334.02	1782.99	1813.81	10.12	15.72	154.21	348.84	153.53	195.32	7.50	0.69	2.80	1.00	7.50
17.10	333.97	1364.14	1409.34	8.90	23.05	226.12	349.87	154.02	195.85	5.41	0.84	2.97	1.00	5.41
17.15	333.92	1199.72	1251.64	7.16	26.48	259.77	350.89	154.51	196.38	4.59	0.79	3.02	1.00	4.59
17.20	333.87	1236.34	1287.42	6.92	26.05	255.55	351.91	155.00	196.91	4.75	0.74	3.00	1.00	4.75
17.25	333.82	1248.55	1304.26	5.88	28.41	278.70	352.94	155.49	197.45	4.82	0.62	2.96	1.00	4.82
17.30	333.77	1260.38	1317.19	6.00	28.97	284.20	353.96	155.98	197.98	4.87	0.62	2.96	1.00	4.87
17.35	333.72	1046.37	1105.86	8.37	30.34	297.64	354.98	156.47	198.51	3.78	1.11	3.16	1.00	3.78
17.40	333.67	1156.23	1215.21	5.15	30.08	295.08	356.00	156.96	199.04	4.32	0.60	3.01	1.00	4.32
17.45	333.62	1154.33	1206.51	8.10	26.61	261.04	357.03	157.45	199.58	4.26	0.95	3.08	1.00	4.26
17.50	333.57	1004.79	1070.38	8.29	33.45	328.14	358.05	157.94	200.11	3.56	1.16	3.19	1.00	3.56
17.55	333.52	1197.05	1249.25	7.30	26.62	261.14	359.07	158.43	200.64	4.44	0.82	3.04	1.00	4.44
17.60	333.47	1427.84	1483.51	5.99	28.39	278.51	360.10	158.92	201.17	5.58	0.53	2.88	1.00	5.58
17.65	333.42	1255.80	1308.17	6.47	26.71	262.03	361.12	159.41	201.71	4.70	0.68	2.99	1.00	4.70
17.70	333.37	1204.68	1265.68	5.88	31.11	305.19	362.14	159.90	202.24	4.47	0.65	3.00	1.00	4.47
17.75	333.32	1248.17	1306.17	6.66	29.58	290.18	363.17	160.39	202.77	4.65	0.71	3.00	1.00	4.65
17.80	333.27	1266.48	1327.52	7.74	31.13	305.39	364.19	160.88	203.30	4.74	0.80	3.01	1.00	4.74
17.85	333.22	1185.99	1237.66	7.39	26.35	258.49	365.21	161.37	203.84	4.28	0.85	3.06	1.00	4.28
17.90	333.17	1091.38	1150.11	6.10	29.95	293.81	366.23	161.87	204.37	3.84	0.78	3.09	1.00	3.84
17.95	333.12	1124.57	1185.38	8.27	31.01	304.21	367.26	162.36	204.90	3.99	1.01	3.12	1.00	3.99

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

18.00	333.07	1037.60	1099.27	7.35	31.45	308.52	368.28	162.85	205.43	3.56	1.01	3.16	1.00	3.56
18.05	333.02	1137.16	1179.51	6.84	21.60	211.90	369.30	163.34	205.97	3.93	0.84	3.10	1.00	3.93
18.10	332.97	935.36	993.52	6.39	29.66	290.96	370.33	163.83	206.50	3.02	1.03	3.23	1.00	3.02
18.15	332.92	2366.26	2425.85	4.09	30.39	298.13	371.35	164.32	207.03	9.92	0.20	2.53	0.92	10.55
18.20	332.87	2040.48	2089.29	9.32	24.89	244.17	372.37	164.81	207.56	8.27	0.54	2.73	0.99	8.32
18.25	332.82	1588.82	1653.61	12.07	33.04	324.12	373.40	165.30	208.10	6.15	0.94	2.93	1.00	6.15
18.30	332.77	1834.11	1891.99	8.69	29.52	289.59	374.42	165.79	208.63	7.27	0.57	2.79	1.00	7.27
18.35	332.72	1497.65	1550.89	11.25	27.15	266.34	375.44	166.28	209.16	5.62	0.96	2.97	1.00	5.62
18.40	332.67	1330.18	1395.73	8.33	33.43	327.95	376.46	166.77	209.69	4.86	0.82	3.00	1.00	4.86
18.45	332.62	2003.10	2051.45	6.05	24.66	241.91	377.49	167.26	210.23	7.96	0.36	2.68	0.98	8.10
18.50	332.57	1211.93	1267.81	9.49	28.50	279.59	378.51	167.75	210.76	4.22	1.07	3.11	1.00	4.22
18.55	332.52	952.91	1015.85	9.31	32.10	314.90	379.53	168.24	211.29	3.01	1.46	3.30	1.00	3.01
18.60	332.47	1157.00	1212.77	8.57	28.44	279.00	380.56	168.73	211.82	3.93	1.03	3.13	1.00	3.93
18.65	332.42	1122.28	1182.77	5.35	30.85	302.64	381.58	169.22	212.36	3.77	0.67	3.08	1.00	3.77
18.70	332.37	1043.70	1104.86	4.55	31.19	305.97	382.60	169.71	212.89	3.39	0.63	3.11	1.00	3.39
18.75	332.32	905.23	974.49	7.65	35.32	346.49	383.63	170.20	213.42	2.77	1.29	3.31	1.00	2.77
18.80	332.27	1166.92	1235.51	7.49	34.98	343.15	384.65	170.69	213.95	3.98	0.88	3.10	1.00	3.98
18.85	332.22	1114.65	1171.85	8.68	29.17	286.16	385.67	171.18	214.49	3.67	1.10	3.17	1.00	3.67
18.90	332.17	984.57	1048.92	8.79	32.82	321.96	386.69	171.68	215.02	3.08	1.33	3.27	1.00	3.08
18.95	332.12	1026.15	1090.58	7.79	32.86	322.36	387.72	172.17	215.55	3.26	1.11	3.22	1.00	3.26
19.00	332.07	1080.70	1146.88	8.95	33.75	331.09	388.74	172.66	216.08	3.51	1.18	3.20	1.00	3.51
19.05	332.02	1308.82	1354.49	8.07	23.29	228.47	389.76	173.15	216.62	4.45	0.84	3.04	1.00	4.45
19.10	331.97	1198.58	1255.50	12.02	29.03	284.78	390.79	173.64	217.15	3.98	1.39	3.18	1.00	3.98
19.15	331.92	1460.65	1525.38	13.62	33.01	323.83	391.81	174.13	217.68	5.21	1.20	3.04	1.00	5.21
19.20	331.87	2852.63	2896.00	25.33	22.12	217.00	392.83	174.62	218.21	11.47	1.01	2.70	0.99	11.57
19.25	331.82	4710.01	4752.97	40.30	21.91	214.94	393.86	175.11	218.75	19.93	0.92	2.47	0.90	21.52
19.30	331.77	5095.29	5131.09	49.75	18.26	179.13	394.88	175.60	219.28	21.60	1.05	2.47	0.90	23.35
19.35	331.72	4788.97	4827.38	53.34	19.59	192.18	395.90	176.09	219.81	20.16	1.20	2.53	0.92	21.43
19.40	331.67	4883.57	4923.81	53.46	20.52	201.30	396.92	176.58	220.34	20.54	1.18	2.51	0.92	21.91

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

19.45	331.62	5534.74	5576.82	55.95	21.46	210.52	397.95	177.07	220.88	23.45	1.08	2.45	0.89	25.54
19.50	331.57	5787.28	5829.44	62.84	21.50	210.92	398.97	177.56	221.41	24.53	1.16	2.44	0.89	26.72
19.55	331.52	6363.68	6406.23	65.24	21.70	212.88	399.99	178.05	221.94	27.06	1.09	2.39	0.87	29.95
19.60	331.47	7267.00	7306.18	62.79	19.98	196.00	401.02	178.54	222.47	31.04	0.91	2.30	0.84	35.32
19.65	331.42	6336.98	6376.47	61.06	20.14	197.57	402.04	179.03	223.01	26.79	1.02	2.38	0.87	29.74
19.70	331.37	4999.92	5043.84	59.94	22.40	219.74	403.06	179.52	223.54	20.76	1.29	2.53	0.93	22.03
19.75	331.32	4282.00	4328.88	49.91	23.91	234.56	404.09	180.01	224.07	17.52	1.27	2.59	0.95	18.25
19.80	331.27	4381.94	4427.35	45.69	23.16	227.20	405.11	180.50	224.60	17.91	1.14	2.56	0.94	18.85
19.85	331.22	4702.38	4752.99	48.27	25.81	253.20	406.13	180.99	225.14	19.31	1.11	2.52	0.92	20.53
19.90	331.17	4300.31	4354.66	54.31	27.72	271.93	407.15	181.49	225.67	17.49	1.38	2.61	0.96	18.12
19.95	331.12	4254.15	4309.21	51.22	28.08	275.46	408.18	181.98	226.20	17.25	1.31	2.60	0.96	17.89
20.00	331.07	4119.87	4171.42	54.05	26.29	257.90	409.20	182.47	226.73	16.59	1.44	2.64	0.97	17.03
20.05	331.02	3610.61	3657.41	54.99	23.87	234.16	410.22	182.96	227.27	14.29	1.69	2.73	1.00	14.29
20.10	330.97	2911.76	2959.39	42.08	24.29	238.28	411.25	183.45	227.80	11.19	1.65	2.82	1.00	11.19
20.15	330.92	2447.51	2498.49	24.63	26.00	255.06	412.27	183.94	228.33	9.14	1.18	2.82	1.00	9.14
20.20	330.87	2019.50	2074.17	13.02	27.88	273.50	413.29	184.43	228.86	7.26	0.78	2.84	1.00	7.26
20.25	330.82	1706.31	1765.57	10.20	30.22	296.46	414.32	184.92	229.40	5.89	0.75	2.91	1.00	5.89
20.30	330.77	1309.59	1375.89	17.97	33.81	331.68	415.34	185.41	229.93	4.18	1.87	3.22	1.00	4.18
20.35	330.72	1223.37	1297.80	12.22	37.96	372.39	416.36	185.90	230.46	3.82	1.39	3.19	1.00	3.82
20.40	330.67	2894.59	2947.79	11.48	27.13	266.15	417.38	186.39	230.99	10.95	0.45	2.58	0.95	11.42
20.45	330.62	2097.70	2140.62	16.91	21.89	214.74	418.41	186.88	231.53	7.44	0.98	2.87	1.00	7.44
20.50	330.57	2184.68	2246.13	13.10	31.34	307.45	419.43	187.37	232.06	7.87	0.72	2.79	1.00	7.87
20.55	330.52	2108.00	2154.47	11.26	23.70	232.50	420.45	187.86	232.59	7.46	0.65	2.80	1.00	7.46
20.60	330.47	1431.66	1489.88	8.67	29.69	291.26	421.48	188.35	233.12	4.58	0.81	3.03	1.00	4.58
20.65	330.42	1152.42	1219.89	7.62	34.41	337.56	422.50	188.84	233.66	3.41	0.96	3.17	1.00	3.41
20.70	330.37	1065.44	1139.23	7.12	37.63	369.15	423.52	189.33	234.19	3.06	1.00	3.22	1.00	3.06
20.75	330.32	1088.71	1162.40	8.14	37.58	368.66	424.55	189.82	234.72	3.14	1.10	3.23	1.00	3.14
20.80	330.27	1097.87	1171.95	8.81	37.78	370.62	425.57	190.31	235.25	3.17	1.18	3.24	1.00	3.17
20.85	330.22	1126.48	1196.19	8.88	35.55	348.75	426.59	190.80	235.79	3.26	1.15	3.22	1.00	3.26

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

20.90	330.17	1039.12	1111.14	10.11	36.73	360.32	427.61	191.30	236.32	2.89	1.48	3.31	1.00	2.89
20.95	330.12	1195.53	1269.55	10.00	37.75	370.33	428.64	191.79	236.85	3.55	1.19	3.19	1.00	3.55
21.00	330.07	1194.00	1257.37	10.77	32.32	317.06	429.66	192.28	237.38	3.49	1.30	3.22	1.00	3.49
21.05	330.02	1205.06	1258.71	8.63	27.36	268.40	430.68	192.77	237.92	3.48	1.04	3.18	1.00	3.48
21.10	329.97	1015.85	1082.15	9.51	33.81	331.68	431.71	193.26	238.45	2.73	1.46	3.34	1.00	2.73
21.15	329.92	965.12	1037.85	9.35	37.09	363.85	432.73	193.75	238.98	2.53	1.54	3.37	1.00	2.53
21.20	329.87	1169.59	1239.51	8.08	35.66	349.82	433.75	194.24	239.51	3.36	1.00	3.19	1.00	3.36
21.25	329.82	1203.16	1269.95	6.33	34.06	334.13	434.78	194.73	240.05	3.48	0.76	3.13	1.00	3.48
21.30	329.77	1179.50	1253.15	7.24	37.56	368.46	435.80	195.22	240.58	3.40	0.89	3.16	1.00	3.40
21.35	329.72	1208.88	1282.18	3.51	37.38	366.70	436.82	195.71	241.11	3.51	0.41	3.04	1.00	3.51
21.40	329.67	1668.17	1732.86	4.36	32.99	323.63	437.84	196.20	241.64	5.36	0.34	2.84	1.00	5.36
21.45	329.62	1446.91	1525.79	4.23	40.23	394.66	438.87	196.69	242.18	4.49	0.39	2.93	1.00	4.49
21.50	329.57	1543.05	1615.01	4.73	36.70	360.03	439.89	197.18	242.71	4.84	0.40	2.90	1.00	4.84
21.55	329.52	1481.25	1555.98	5.45	38.11	373.86	440.91	197.67	243.24	4.58	0.49	2.95	1.00	4.58
21.60	329.47	1283.26	1359.63	6.87	38.95	382.10	441.94	198.16	243.77	3.76	0.75	3.09	1.00	3.76
21.65	329.42	1084.52	1162.29	8.20	39.66	389.06	442.96	198.65	244.31	2.94	1.14	3.26	1.00	2.94
21.70	329.37	933.46	1009.23	7.21	38.64	379.06	443.98	199.14	244.84	2.31	1.27	3.38	1.00	2.31
21.75	329.32	1093.67	1167.99	5.09	37.90	371.80	445.01	199.63	245.37	2.95	0.70	3.18	1.00	2.95
21.80	329.27	1204.30	1279.91	6.04	38.56	378.27	446.03	200.12	245.90	3.39	0.72	3.13	1.00	3.39
21.85	329.22	1138.31	1217.17	6.82	40.22	394.56	447.05	200.61	246.44	3.13	0.89	3.20	1.00	3.13
21.90	329.17	1260.76	1336.35	4.86	38.55	378.18	448.07	201.11	246.97	3.60	0.55	3.07	1.00	3.60
21.95	329.12	1133.35	1208.90	6.48	38.53	377.98	449.10	201.60	247.50	3.07	0.85	3.20	1.00	3.07
22.00	329.07	852.97	935.07	5.46	41.87	410.74	450.12	202.09	248.03	1.96	1.13	3.42	1.00	1.96
22.05	329.02	902.94	965.61	7.12	31.96	313.53	451.14	202.58	248.57	2.07	1.38	3.44	1.00	2.07
22.10	328.97	834.66	913.54	7.36	40.23	394.66	452.17	203.07	249.10	1.85	1.60	3.50	1.00	1.85
22.15	328.92	1012.04	1088.67	5.75	39.08	383.37	453.19	203.56	249.63	2.55	0.91	3.28	1.00	2.55
22.20	328.87	994.11	1069.74	5.30	38.57	378.37	454.21	204.05	250.16	2.46	0.86	3.29	1.00	2.46
22.25	328.82	983.05	1068.17	7.71	43.41	425.85	455.24	204.54	250.70	2.44	1.26	3.35	1.00	2.44
22.30	328.77	1495.74	1578.47	5.34	42.19	413.88	456.26	205.03	251.23	4.47	0.48	2.96	1.00	4.47

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

22.35	328.72	1644.52	1709.48	7.30	33.13	325.01	457.28	205.52	251.76	4.97	0.58	2.94	1.00	4.97
22.40	328.67	1184.85	1266.62	5.74	41.70	409.08	458.30	206.01	252.29	3.20	0.71	3.15	1.00	3.20
22.45	328.62	1058.96	1139.10	7.72	40.87	400.93	459.33	206.50	252.83	2.69	1.14	3.30	1.00	2.69
22.50	328.57	1095.20	1183.50	7.57	45.03	441.74	460.35	206.99	253.36	2.85	1.05	3.26	1.00	2.85
22.55	328.52	1074.98	1147.75	7.12	37.11	364.05	461.37	207.48	253.89	2.70	1.04	3.28	1.00	2.70
22.60	328.47	1007.08	1089.71	8.45	42.14	413.39	462.40	207.97	254.42	2.47	1.35	3.36	1.00	2.47
22.65	328.42	1010.51	1093.94	9.37	42.55	417.42	463.42	208.46	254.96	2.47	1.49	3.38	1.00	2.47
22.70	328.37	1435.85	1514.71	7.02	40.22	394.56	464.44	208.95	255.49	4.11	0.67	3.04	1.00	4.11
22.75	328.32	1375.20	1448.14	5.44	37.20	364.93	465.47	209.44	256.02	3.84	0.55	3.04	1.00	3.84
22.80	328.27	1050.57	1131.57	6.84	41.31	405.25	466.49	209.93	256.55	2.59	1.03	3.30	1.00	2.59
22.85	328.22	944.52	1031.33	6.32	44.27	434.29	467.51	210.42	257.09	2.19	1.12	3.38	1.00	2.19
22.90	328.17	1215.74	1299.06	5.13	42.49	416.83	468.53	210.92	257.62	3.22	0.62	3.13	1.00	3.22
22.95	328.12	1193.62	1276.88	6.90	42.46	416.53	469.56	211.41	258.15	3.13	0.85	3.19	1.00	3.13
23.00	328.07	1216.51	1304.02	9.47	44.63	437.82	470.58	211.90	258.68	3.22	1.14	3.22	1.00	3.22
23.05	328.02	1404.95	1472.81	7.00	34.61	339.52	471.60	212.39	259.22	3.86	0.70	3.07	1.00	3.86
23.10	327.97	1352.69	1421.99	6.68	35.34	346.69	472.63	212.88	259.75	3.65	0.70	3.10	1.00	3.65
23.15	327.92	1161.96	1247.14	7.50	43.44	426.15	473.65	213.37	260.28	2.97	0.97	3.23	1.00	2.97
23.20	327.87	996.40	1081.97	6.78	43.64	428.11	474.67	213.86	260.81	2.33	1.12	3.35	1.00	2.33
23.25	327.82	2071.38	2156.81	7.03	43.57	427.42	475.70	214.35	261.35	6.43	0.42	2.79	1.00	6.43
23.30	327.77	1776.12	1850.96	7.81	38.17	374.45	476.72	214.84	261.88	5.25	0.57	2.92	1.00	5.25
23.35	327.72	1419.45	1504.31	9.51	43.28	424.58	477.74	215.33	262.41	3.91	0.93	3.11	1.00	3.91
23.40	327.67	1102.07	1195.44	5.98	47.62	467.15	478.76	215.82	262.94	2.73	0.83	3.24	1.00	2.73
23.45	327.62	1001.36	1093.38	10.40	46.93	460.38	479.79	216.31	263.48	2.33	1.69	3.42	1.00	2.33
23.50	327.57	1454.16	1550.87	10.85	49.32	483.83	480.81	216.80	264.01	4.05	1.01	3.11	1.00	4.05
23.55	327.52	3388.98	3432.98	10.14	22.44	220.14	481.83	217.29	264.54	11.16	0.34	2.54	0.95	11.72
23.60	327.47	2614.59	2680.91	11.91	33.82	331.77	482.86	217.78	265.07	8.29	0.54	2.72	1.00	8.29
23.65	327.42	2111.05	2189.95	13.60	40.24	394.75	483.88	218.27	265.61	6.42	0.80	2.89	1.00	6.42
23.70	327.37	2283.86	2361.18	11.87	39.43	386.81	484.90	218.76	266.14	7.05	0.63	2.81	1.00	7.05
23.75	327.32	3120.42	3180.62	19.80	30.70	301.17	485.93	219.25	266.67	10.10	0.73	2.69	1.00	10.10

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

23.80	327.27	3567.51	3634.34	28.08	34.08	334.32	486.95	219.74	267.20	11.78	0.89	2.67	1.00	11.78
23.85	327.22	3541.95	3606.15	38.91	32.74	321.18	487.97	220.23	267.74	11.65	1.25	2.74	1.00	11.65
23.90	327.17	2836.99	2913.42	35.23	38.98	382.39	488.99	220.73	268.27	9.04	1.45	2.87	1.00	9.04
23.95	327.12	3229.90	3297.39	37.53	34.42	337.66	490.02	221.22	268.80	10.44	1.34	2.80	1.00	10.44
24.00	327.07	3084.95	3142.93	35.47	29.57	290.08	491.04	221.71	269.33	9.85	1.34	2.82	1.00	9.85
24.05	327.02	3117.75	3173.36	37.50	28.36	278.21	492.06	222.20	269.87	9.94	1.40	2.82	1.00	9.94
24.10	326.97	2044.30	2119.13	34.03	38.16	374.35	493.09	222.69	270.40	6.01	2.09	3.10	1.00	6.01
24.15	326.92	1581.95	1670.15	21.31	44.98	441.25	494.11	223.18	270.93	4.34	1.81	3.19	1.00	4.34
24.20	326.87	1331.71	1420.71	13.02	45.39	445.28	495.13	223.67	271.46	3.41	1.41	3.24	1.00	3.41
24.25	326.82	2023.32	2113.95	6.54	46.22	453.42	496.16	224.16	272.00	5.95	0.40	2.82	1.00	5.95
24.30	326.77	1894.76	1960.37	6.62	33.46	328.24	497.18	224.65	272.53	5.37	0.45	2.88	1.00	5.37
24.35	326.72	1995.09	2080.88	5.87	43.75	429.19	498.20	225.14	273.06	5.80	0.37	2.82	1.00	5.80
24.40	326.67	1921.84	2001.02	9.79	40.38	396.13	499.22	225.63	273.59	5.49	0.65	2.92	1.00	5.49
24.45	326.62	1396.18	1489.12	14.41	47.40	464.99	500.25	226.12	274.13	3.61	1.46	3.22	1.00	3.61
24.50	326.57	1255.04	1357.32	10.04	52.16	511.69	501.27	226.61	274.66	3.12	1.17	3.24	1.00	3.12
24.55	326.52	2137.38	2217.83	10.09	41.03	402.50	502.29	227.10	275.19	6.23	0.59	2.85	1.00	6.23
24.60	326.47	2392.96	2473.88	22.46	41.27	404.86	503.32	227.59	275.72	7.15	1.14	2.91	1.00	7.15
24.65	326.42	2192.69	2276.89	21.91	42.94	421.24	504.34	228.08	276.26	6.42	1.24	2.97	1.00	6.42
24.70	326.37	2425.77	2498.44	23.04	37.06	363.56	505.36	228.57	276.79	7.20	1.16	2.91	1.00	7.20
24.75	326.32	1878.74	1965.13	21.99	44.06	432.23	506.39	229.06	277.32	5.26	1.51	3.08	1.00	5.26
24.80	326.27	1540.76	1630.19	13.18	45.61	447.43	507.41	229.55	277.85	4.04	1.17	3.14	1.00	4.04
24.85	326.22	1569.75	1656.28	7.17	44.13	432.92	508.43	230.04	278.39	4.12	0.62	3.03	1.00	4.12
24.90	326.17	1447.68	1544.66	4.81	49.46	485.20	509.45	230.54	278.92	3.71	0.47	3.03	1.00	3.71
24.95	326.12	1818.85	1904.46	15.65	43.66	428.30	510.48	231.03	279.45	4.99	1.12	3.05	1.00	4.99
25.00	326.07	1679.61	1772.18	22.38	47.21	463.13	511.50	231.52	279.98	4.50	1.77	3.18	1.00	4.50
25.05	326.02	2553.94	2625.61	12.67	36.55	358.56	512.52	232.01	280.52	7.53	0.60	2.78	1.00	7.53
25.10	325.97	4039.00	4085.20	26.79	23.56	231.12	513.55	232.50	281.05	12.71	0.75	2.61	0.98	12.92
25.15	325.92	3866.96	3944.28	21.38	39.43	386.81	514.57	232.99	281.58	12.18	0.62	2.59	0.98	12.46
25.20	325.87	6293.87	6340.56	18.40	23.81	233.58	515.59	233.48	282.11	20.65	0.32	2.27	0.86	23.96

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

25.25	325.82	4238.51	4302.83	39.37	32.80	321.77	516.62	233.97	282.65	13.40	1.04	2.65	1.00	13.40
25.30	325.77	4977.42	5071.11	39.63	47.78	468.72	517.64	234.46	283.18	16.08	0.87	2.54	0.96	16.75
25.35	325.72	5995.18	6035.38	44.59	20.50	201.11	518.66	234.95	283.71	19.44	0.81	2.46	0.93	20.97
25.40	325.67	3570.56	3635.01	60.11	32.87	322.45	519.68	235.44	284.24	10.96	1.93	2.86	1.00	10.96
25.45	325.62	2455.90	2540.94	41.29	43.37	425.46	520.71	235.93	284.78	7.09	2.04	3.03	1.00	7.09
25.50	325.57	3031.16	3090.06	25.14	30.04	294.69	521.73	236.42	285.31	9.00	0.98	2.79	1.00	9.00
25.55	325.52	3508.00	3568.33	22.36	30.77	301.85	522.75	236.91	285.84	10.65	0.73	2.67	1.00	10.65
25.60	325.47	3786.85	3854.60	32.77	34.55	338.94	523.78	237.40	286.37	11.63	0.98	2.69	1.00	11.63
25.65	325.42	3482.82	3558.31	52.17	38.50	377.69	524.80	237.89	286.91	10.57	1.72	2.85	1.00	10.57
25.70	325.37	2873.23	2951.98	53.17	40.16	393.97	525.82	238.38	287.44	8.44	2.19	2.98	1.00	8.44
25.75	325.32	3498.08	3566.34	39.43	34.81	341.49	526.85	238.87	287.97	10.55	1.30	2.79	1.00	10.55
25.80	325.27	2756.50	2824.40	31.07	34.63	339.72	527.87	239.36	288.50	7.96	1.35	2.90	1.00	7.96
25.85	325.22	1667.40	1761.36	20.38	47.92	470.10	528.89	239.85	289.04	4.26	1.65	3.18	1.00	4.26
25.90	325.17	1690.67	1793.38	13.76	52.38	513.85	529.91	240.35	289.57	4.36	1.09	3.10	1.00	4.36
25.95	325.12	1282.12	1373.77	13.83	46.74	458.52	530.94	240.84	290.10	2.91	1.64	3.33	1.00	2.91
26.00	325.07	1117.33	1223.45	9.80	54.12	530.92	531.96	241.33	290.63	2.38	1.42	3.38	1.00	2.38
26.05	325.02	1412.96	1485.18	8.31	36.83	361.30	532.98	241.82	291.17	3.27	0.87	3.18	1.00	3.27
26.10	324.97	1417.54	1505.33	6.20	44.77	439.19	534.01	242.31	291.70	3.33	0.64	3.12	1.00	3.33
26.15	324.92	1651.76	1737.06	5.30	43.50	426.74	535.03	242.80	292.23	4.11	0.44	2.98	1.00	4.11
26.20	324.87	1554.87	1646.30	5.80	46.63	457.44	536.05	243.29	292.76	3.79	0.52	3.04	1.00	3.79
26.25	324.82	1433.94	1530.61	6.50	49.30	483.63	537.08	243.78	293.30	3.39	0.65	3.12	1.00	3.39
26.30	324.77	1163.10	1265.75	7.05	52.35	513.55	538.10	244.27	293.83	2.48	0.97	3.30	1.00	2.48
26.35	324.72	1260.38	1365.89	6.36	53.81	527.88	539.12	244.76	294.36	2.81	0.77	3.22	1.00	2.81
26.40	324.67	1452.64	1545.27	7.35	47.24	463.42	540.14	245.25	294.89	3.41	0.73	3.13	1.00	3.41
26.45	324.62	1403.05	1502.95	7.94	50.95	499.82	541.17	245.74	295.43	3.26	0.83	3.17	1.00	3.26
26.50	324.57	1288.22	1386.07	5.83	49.90	489.52	542.19	246.23	295.96	2.85	0.69	3.20	1.00	2.85
26.55	324.52	1324.84	1422.63	5.82	49.87	489.22	543.21	246.72	296.49	2.97	0.66	3.17	1.00	2.97
26.60	324.47	1385.12	1485.98	5.26	51.44	504.63	544.24	247.21	297.02	3.17	0.56	3.12	1.00	3.17
26.65	324.42	1552.96	1651.94	5.00	50.48	495.21	545.26	247.70	297.56	3.72	0.45	3.03	1.00	3.72

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

26.70	324.37	1409.53	1509.38	7.12	50.92	499.53	546.28	248.19	298.09	3.23	0.74	3.15	1.00	3.23
26.75	324.32	1090.24	1200.69	8.85	56.33	552.60	547.31	248.68	298.62	2.19	1.35	3.41	1.00	2.19
26.80	324.27	1199.72	1307.66	4.48	55.05	540.04	548.33	249.17	299.15	2.54	0.59	3.22	1.00	2.54
26.85	324.22	1262.28	1363.60	7.15	51.67	506.88	549.35	249.66	299.69	2.72	0.88	3.25	1.00	2.72
26.90	324.17	1133.35	1246.37	5.11	57.64	565.45	550.37	250.16	300.22	2.32	0.73	3.29	1.00	2.32
26.95	324.12	1480.87	1579.38	15.35	50.24	492.85	551.40	250.65	300.75	3.42	1.49	3.25	1.00	3.42
27.00	324.07	1296.23	1403.13	20.05	54.52	534.84	552.42	251.14	301.28	2.82	2.36	3.41	1.00	2.82
27.05	324.02	1361.46	1448.93	18.80	44.61	437.62	553.44	251.63	301.82	2.97	2.10	3.37	1.00	2.97
27.10	323.97	1510.62	1602.27	16.46	46.74	458.52	554.47	252.12	302.35	3.47	1.57	3.25	1.00	3.47
27.15	323.92	1356.89	1445.64	8.95	45.26	444.00	555.49	252.61	302.88	2.94	1.00	3.24	1.00	2.94
27.20	323.87	1614.76	1705.33	5.85	46.19	453.12	556.51	253.10	303.41	3.79	0.51	3.04	1.00	3.79
27.25	323.82	1654.43	1751.53	6.00	49.52	485.79	557.54	253.59	303.95	3.93	0.50	3.02	1.00	3.93
27.30	323.77	1724.62	1827.54	8.78	52.49	514.93	558.56	254.08	304.48	4.17	0.69	3.04	1.00	4.17
27.35	323.72	1984.41	2082.24	16.91	49.89	489.42	559.58	254.57	305.01	4.99	1.11	3.05	1.00	4.99
27.40	323.67	1924.90	2027.08	22.47	52.11	511.20	560.60	255.06	305.54	4.80	1.53	3.12	1.00	4.80
27.45	323.62	1433.18	1541.65	24.52	55.32	542.69	561.63	255.55	306.08	3.20	2.50	3.38	1.00	3.20
27.50	323.57	1132.20	1246.87	21.99	58.48	573.69	562.65	256.04	306.61	2.23	3.21	3.57	1.00	2.23
27.55	323.52	976.18	1094.06	11.39	60.12	589.78	563.67	256.53	307.14	1.73	2.15	3.59	1.00	1.73
27.60	323.47	1093.67	1206.65	10.09	57.62	565.25	564.70	257.02	307.67	2.09	1.57	3.45	1.00	2.09
27.65	323.42	1054.76	1169.88	9.56	58.71	575.95	565.72	257.51	308.21	1.96	1.58	3.48	1.00	1.96
27.70	323.37	1145.93	1255.27	9.14	55.76	547.01	566.74	258.00	308.74	2.23	1.33	3.40	1.00	2.23
27.75	323.32	1101.30	1209.22	9.81	55.04	539.94	567.77	258.49	309.27	2.07	1.53	3.45	1.00	2.07
27.80	323.27	1045.23	1157.33	10.46	57.17	560.84	568.79	258.98	309.80	1.90	1.78	3.51	1.00	1.90
27.85	323.22	1115.04	1225.77	10.26	56.47	553.97	569.81	259.47	310.34	2.11	1.56	3.45	1.00	2.11
27.90	323.17	1151.28	1257.13	11.31	53.98	529.54	570.83	259.97	310.87	2.21	1.65	3.44	1.00	2.21
27.95	323.12	1095.58	1206.13	9.90	56.38	553.09	571.86	260.46	311.40	2.04	1.56	3.46	1.00	2.04
28.00	323.07	1144.03	1250.62	11.52	54.36	533.27	572.88	260.95	311.93	2.17	1.70	3.45	1.00	2.17
28.05	323.02	1393.89	1480.52	10.24	44.18	433.41	573.90	261.44	312.47	2.90	1.13	3.27	1.00	2.90
28.10	322.97	1287.46	1385.80	10.68	50.15	491.97	574.93	261.93	313.00	2.59	1.32	3.34	1.00	2.59

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

28.15	322.92	1197.43	1302.82	9.50	53.75	527.29	575.95	262.42	313.53	2.32	1.31	3.38	1.00	2.32
28.20	322.87	1156.62	1262.13	9.95	53.81	527.88	576.97	262.91	314.06	2.18	1.45	3.42	1.00	2.18
28.25	322.82	1133.35	1244.37	10.71	56.62	555.44	578.00	263.40	314.60	2.12	1.61	3.45	1.00	2.12
28.30	322.77	1199.34	1310.79	7.87	56.84	557.60	579.02	263.89	315.13	2.32	1.08	3.35	1.00	2.32
28.35	322.72	1387.40	1491.83	5.28	53.26	522.48	580.04	264.38	315.66	2.89	0.58	3.17	1.00	2.89
28.40	322.67	1464.08	1569.95	4.84	53.99	529.64	581.06	264.87	316.19	3.13	0.49	3.11	1.00	3.13
28.45	322.62	1460.65	1569.40	5.00	55.46	544.06	582.09	265.36	316.73	3.12	0.51	3.12	1.00	3.12
28.50	322.57	1501.85	1610.46	4.22	55.39	543.38	583.11	265.85	317.26	3.24	0.41	3.07	1.00	3.24
28.55	322.52	1586.53	1694.12	4.66	54.87	538.27	584.13	266.34	317.79	3.49	0.42	3.05	1.00	3.49
28.60	322.47	1520.54	1631.46	4.58	56.57	554.95	585.16	266.83	318.32	3.29	0.44	3.08	1.00	3.29
28.65	322.42	1520.54	1630.99	6.66	56.33	552.60	586.18	267.32	318.86	3.28	0.64	3.13	1.00	3.28
28.70	322.37	1390.08	1507.08	7.53	59.67	585.36	587.20	267.81	319.39	2.88	0.82	3.22	1.00	2.88
28.75	322.32	1470.57	1582.59	7.83	57.13	560.45	588.23	268.30	319.92	3.11	0.79	3.18	1.00	3.11
28.80	322.27	1325.61	1440.48	7.95	58.58	574.67	589.25	268.79	320.45	2.66	0.93	3.27	1.00	2.66
28.85	322.22	1217.65	1332.28	7.91	58.46	573.49	590.27	269.28	320.99	2.31	1.07	3.35	1.00	2.31
28.90	322.17	1100.16	1217.20	10.18	59.69	585.56	591.29	269.78	321.52	1.95	1.63	3.49	1.00	1.95
28.95	322.12	1013.57	1141.14	14.45	65.06	638.24	592.32	270.27	322.05	1.70	2.63	3.63	1.00	1.70
29.00	322.07	1157.76	1282.45	7.87	63.59	623.82	593.34	270.76	322.58	2.14	1.14	3.39	1.00	2.14
29.05	322.02	1500.70	1587.15	10.97	44.09	432.52	594.36	271.25	323.12	3.07	1.10	3.24	1.00	3.07
29.10	321.97	1029.97	1146.70	10.88	59.53	583.99	595.39	271.74	323.65	1.70	1.97	3.58	1.00	1.70
29.15	321.92	1040.27	1164.57	10.30	63.39	621.86	596.41	272.23	324.18	1.75	1.81	3.55	1.00	1.75
29.20	321.87	1057.43	1179.63	10.12	62.32	611.36	597.43	272.72	324.71	1.79	1.74	3.53	1.00	1.79
29.25	321.82	1120.38	1241.99	9.88	62.02	608.42	598.46	273.21	325.25	1.98	1.54	3.47	1.00	1.98
29.30	321.77	1166.92	1287.59	9.47	61.54	603.71	599.48	273.70	325.78	2.11	1.38	3.43	1.00	2.11
29.35	321.72	1160.43	1279.22	9.50	60.58	594.29	600.50	274.19	326.31	2.08	1.40	3.44	1.00	2.08
29.40	321.67	1138.69	1257.46	9.82	60.57	594.19	601.52	274.68	326.84	2.01	1.50	3.46	1.00	2.01
29.45	321.62	1169.20	1286.89	11.43	60.02	588.80	602.55	275.17	327.38	2.09	1.67	3.46	1.00	2.09
29.50	321.57	1181.79	1300.30	10.16	60.44	592.92	603.57	275.66	327.91	2.12	1.46	3.43	1.00	2.12
29.55	321.52	1242.45	1359.04	10.37	59.46	583.30	604.59	276.15	328.44	2.30	1.37	3.39	1.00	2.30

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

29.60	321.47	1130.30	1251.52	7.84	61.82	606.45	605.62	276.64	328.97	1.96	1.21	3.43	1.00	1.96
29.65	321.42	1200.87	1325.48	8.29	63.55	623.43	606.64	277.13	329.51	2.18	1.15	3.38	1.00	2.18
29.70	321.37	989.53	1119.73	9.93	66.40	651.38	607.66	277.62	330.04	1.55	1.94	3.61	1.00	1.55
29.75	321.32	1004.41	1146.69	11.20	72.56	711.81	608.69	278.11	330.57	1.63	2.08	3.60	1.00	1.63
29.80	321.27	1066.97	1208.48	11.52	72.17	707.99	609.71	278.60	331.10	1.81	1.92	3.55	1.00	1.81
29.85	321.22	1062.01	1206.05	11.86	73.46	720.64	610.73	279.09	331.64	1.80	1.99	3.56	1.00	1.80
29.90	321.17	1096.34	1243.38	11.91	74.99	735.65	611.75	279.59	332.17	1.90	1.89	3.52	1.00	1.90
29.95	321.12	1142.50	1288.84	21.16	74.63	732.12	612.78	280.08	332.70	2.03	3.13	3.60	1.00	2.03
30.00	321.07	1100.92	1251.35	21.81	76.72	752.62	613.80	280.57	333.23	1.91	3.42	3.64	1.00	1.91
30.05	321.02	1176.45	1305.85	18.58	65.99	647.36	614.82	281.06	333.77	2.07	2.69	3.56	1.00	2.07
30.10	320.97	1093.67	1240.20	16.02	74.73	733.10	615.85	281.55	334.30	1.87	2.57	3.59	1.00	1.87
30.15	320.92	1143.27	1293.57	14.75	76.65	751.94	616.87	282.04	334.83	2.02	2.18	3.53	1.00	2.02
30.20	320.87	1115.04	1268.28	14.43	78.15	766.65	617.89	282.53	335.36	1.94	2.22	3.55	1.00	1.94
30.25	320.82	1114.65	1267.63	14.49	78.02	765.38	618.92	283.02	335.90	1.93	2.23	3.55	1.00	1.93
30.30	320.77	1109.31	1264.33	14.07	79.06	775.58	619.94	283.51	336.43	1.92	2.18	3.55	1.00	1.92
30.35	320.72	1108.17	1262.51	13.81	78.71	772.15	620.96	284.00	336.96	1.90	2.15	3.55	1.00	1.90
30.40	320.67	1125.34	1281.52	13.95	79.65	781.37	621.98	284.49	337.49	1.95	2.12	3.53	1.00	1.95
30.45	320.62	1060.49	1214.92	13.09	78.76	772.64	623.01	284.98	338.03	1.75	2.21	3.59	1.00	1.75
30.50	320.57	1095.20	1248.14	13.34	78.00	765.18	624.03	285.47	338.56	1.84	2.14	3.56	1.00	1.84
30.55	320.52	1111.98	1266.24	14.27	78.67	771.75	625.05	285.96	339.09	1.89	2.23	3.56	1.00	1.89
30.60	320.47	1125.72	1280.78	16.48	79.08	775.77	626.08	286.45	339.62	1.93	2.52	3.57	1.00	1.93
30.65	320.42	1158.52	1308.21	15.95	76.34	748.90	627.10	286.94	340.16	2.00	2.34	3.54	1.00	2.00
30.70	320.37	1208.12	1351.14	13.06	72.94	715.54	628.12	287.43	340.69	2.12	1.81	3.47	1.00	2.12
30.75	320.32	1185.99	1328.76	12.97	72.81	714.27	629.15	287.92	341.22	2.05	1.85	3.49	1.00	2.05
30.80	320.27	1159.29	1302.47	13.95	73.02	716.33	630.17	288.41	341.75	1.97	2.07	3.53	1.00	1.97
30.85	320.22	1185.99	1327.42	14.84	72.13	707.60	631.19	288.90	342.29	2.03	2.13	3.52	1.00	2.03
30.90	320.17	1194.76	1338.68	14.88	73.40	720.05	632.21	289.40	342.82	2.06	2.11	3.51	1.00	2.06
30.95	320.12	1247.79	1391.30	21.25	73.19	717.99	633.24	289.89	343.35	2.21	2.80	3.54	1.00	2.21
31.00	320.07	1259.99	1399.72	21.48	71.26	699.06	634.26	290.38	343.88	2.23	2.81	3.54	1.00	2.23

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

31.05	320.02	1244.74	1361.64	23.19	59.62	584.87	635.28	290.87	344.42	2.11	3.19	3.59	1.00	2.11
31.10	319.97	1148.61	1288.69	17.38	71.44	700.83	636.31	291.36	344.95	1.89	2.66	3.59	1.00	1.89
31.15	319.92	1272.58	1412.78	14.62	71.50	701.42	637.33	291.85	345.48	2.24	1.89	3.46	1.00	2.24
31.20	319.87	1157.00	1305.40	13.12	75.68	742.42	638.35	292.34	346.01	1.93	1.97	3.53	1.00	1.93
31.25	319.82	1148.99	1300.70	13.24	77.37	759.00	639.38	292.83	346.55	1.91	2.00	3.53	1.00	1.91
31.30	319.77	1153.95	1305.68	13.36	77.38	759.10	640.40	293.32	347.08	1.92	2.01	3.53	1.00	1.92
31.35	319.72	1158.90	1313.16	13.65	78.67	771.75	641.42	293.81	347.61	1.93	2.03	3.53	1.00	1.93
31.40	319.67	1222.23	1375.00	14.86	77.91	764.30	642.44	294.30	348.14	2.10	2.03	3.50	1.00	2.10
31.45	319.62	1191.71	1345.32	15.01	78.34	768.52	643.47	294.79	348.68	2.01	2.14	3.53	1.00	2.01
31.50	319.57	1188.28	1344.40	15.90	79.62	781.07	644.49	295.28	349.21	2.00	2.27	3.54	1.00	2.00
31.55	319.52	1157.76	1315.96	15.07	80.68	791.47	645.51	295.77	349.74	1.92	2.25	3.55	1.00	1.92
31.60	319.47	1150.13	1306.15	15.43	79.57	780.58	646.54	296.26	350.27	1.88	2.34	3.57	1.00	1.88
31.65	319.42	1157.38	1316.23	14.70	81.01	794.71	647.56	296.75	350.81	1.91	2.20	3.55	1.00	1.91
31.70	319.37	1198.58	1351.68	14.57	78.08	765.96	648.58	297.24	351.34	2.00	2.07	3.52	1.00	2.00
31.75	319.32	1208.12	1364.61	16.24	79.81	782.94	649.61	297.73	351.87	2.03	2.27	3.53	1.00	2.03
31.80	319.27	1222.23	1379.04	17.28	79.97	784.51	650.63	298.22	352.40	2.07	2.37	3.54	1.00	2.07
31.85	319.22	1201.63	1361.44	18.65	81.50	799.52	651.65	298.71	352.94	2.01	2.63	3.57	1.00	2.01
31.90	319.17	1252.37	1413.02	18.78	81.93	803.73	652.67	299.21	353.47	2.15	2.47	3.53	1.00	2.15
31.95	319.12	1260.76	1419.25	28.96	80.83	792.94	653.70	299.70	354.00	2.16	3.78	3.61	1.00	2.16
32.00	319.07	1268.39	1425.39	27.70	80.07	785.49	654.72	300.19	354.53	2.17	3.59	3.60	1.00	2.17
32.05	319.02	1371.00	1498.26	25.39	64.90	636.67	655.74	300.68	355.07	2.37	3.01	3.53	1.00	2.37
32.10	318.97	1259.61	1410.75	23.00	77.08	756.15	656.77	301.17	355.60	2.12	3.05	3.58	1.00	2.12
32.15	318.92	1260.38	1414.44	20.04	78.57	770.77	657.79	301.66	356.13	2.12	2.65	3.55	1.00	2.12
32.20	318.87	1211.93	1369.33	17.61	80.27	787.45	658.81	302.15	356.66	1.99	2.48	3.56	1.00	1.99
32.25	318.82	1251.98	1412.16	23.90	81.69	801.38	659.84	302.64	357.20	2.11	3.18	3.59	1.00	2.11
32.30	318.77	1666.26	1833.48	31.03	85.28	836.60	660.86	303.13	357.73	3.28	2.65	3.38	1.00	3.28
32.35	318.72	1908.88	2099.96	56.02	97.45	955.98	661.88	303.62	358.26	4.01	3.90	3.39	1.00	4.01
32.40	318.67	2166.75	2369.46	70.44	103.38	1014.16	662.90	304.11	358.79	4.76	4.13	3.34	1.00	4.76
32.45	318.62	2697.37	2895.53	70.58	101.06	991.40	663.93	304.60	359.33	6.21	3.16	3.18	1.00	6.21

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

32.50	318.57	2872.85	3022.64	71.59	76.39	749.39	664.95	305.09	359.86	6.55	3.04	3.15	1.00	6.55
32.55	318.52	2902.99	3061.52	97.58	80.85	793.14	665.97	305.58	360.39	6.65	4.07	3.22	1.00	6.65
32.60	318.47	3828.81	4003.58	122.70	89.13	874.37	667.00	306.07	360.92	9.24	3.68	3.08	1.00	9.24
32.65	318.42	9966.66	10018.86	187.50	26.62	261.14	668.02	306.56	361.46	25.87	2.01	2.56	1.00	25.87
32.70	318.37	11286.16	11271.06	271.07	-7.70	-75.54	669.04	307.05	361.99	29.29	2.56	2.58	1.00	29.29
32.75	318.32	9290.31	9276.35	314.09	-7.12	-69.85	670.07	307.54	362.52	23.74	3.65	2.75	1.00	23.74
32.80	318.27	5487.44	5474.75	244.50	-6.47	-63.47	671.09	308.03	363.05	13.23	5.09	3.04	1.00	13.23
32.85	318.22	4054.26	4052.34	164.08	-0.98	-9.61	672.11	308.52	363.59	9.30	4.85	3.15	1.00	9.30
32.90	318.17	3318.02	3368.69	108.56	25.84	253.49	673.13	309.02	364.12	7.40	4.03	3.18	1.00	7.40
32.95	318.12	3318.41	3376.18	93.09	29.46	289.00	674.16	309.51	364.65	7.41	3.45	3.14	1.00	7.41
33.00	318.07	3351.97	3412.89	77.61	31.07	304.80	675.18	310.00	365.18	7.50	2.83	3.09	1.00	7.50
33.05	318.02	4554.37	4585.10	74.97	15.67	153.72	676.20	310.49	365.72	10.69	1.92	2.87	1.00	10.69
33.10	317.97	3752.52	3825.78	48.49	37.36	366.50	677.23	310.98	366.25	8.60	1.54	2.90	1.00	8.60
33.15	317.92	3337.86	3443.35	50.16	53.80	527.78	678.25	311.47	366.78	7.54	1.81	2.98	1.00	7.54
33.20	317.87	2704.62	2842.05	38.65	70.09	687.58	679.27	311.96	367.31	5.89	1.79	3.08	1.00	5.89
33.25	317.82	4126.74	4304.57	56.59	90.69	889.67	680.30	312.45	367.85	9.85	1.56	2.85	1.00	9.85
33.30	317.77	4086.68	4154.80	55.69	34.74	340.80	681.32	312.94	368.38	9.43	1.60	2.87	1.00	9.43
33.35	317.72	3165.82	3264.35	42.43	50.25	492.95	682.34	313.43	368.91	7.00	1.64	2.99	1.00	7.00
33.40	317.67	2151.87	2308.29	26.87	79.77	782.54	683.36	313.92	369.44	4.40	1.65	3.17	1.00	4.40
33.45	317.62	1882.17	2091.70	19.18	106.86	1048.30	684.39	314.41	369.98	3.80	1.36	3.19	1.00	3.80
33.50	317.57	1890.56	2095.35	16.18	104.44	1024.56	685.41	314.90	370.51	3.81	1.15	3.16	1.00	3.81
33.55	317.52	1961.14	2143.10	18.88	92.80	910.37	686.43	315.39	371.04	3.93	1.30	3.17	1.00	3.93
33.60	317.47	1758.58	1913.76	21.14	79.14	776.36	687.46	315.88	371.57	3.30	1.72	3.29	1.00	3.30
33.65	317.42	1958.47	2148.89	33.68	97.11	952.65	688.48	316.37	372.11	3.92	2.31	3.28	1.00	3.92
33.70	317.37	2859.50	2971.99	43.83	57.37	562.80	689.50	316.86	372.64	6.13	1.92	3.08	1.00	6.13
33.75	317.32	2684.78	2799.76	39.95	58.64	575.26	690.53	317.35	373.17	5.65	1.89	3.10	1.00	5.65
33.80	317.27	2664.95	2808.52	44.92	73.22	718.29	691.55	317.84	373.70	5.66	2.12	3.13	1.00	5.66
33.85	317.22	2897.64	3005.21	46.01	54.86	538.18	692.57	318.33	374.24	6.18	1.99	3.08	1.00	6.18
33.90	317.17	2713.01	2830.33	49.75	59.83	586.93	693.59	318.83	374.77	5.70	2.33	3.14	1.00	5.70

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

33.95	317.12	2285.77	2420.66	51.47	68.79	674.83	694.62	319.32	375.30	4.60	2.98	3.28	1.00	4.60
34.00	317.07	2220.15	2388.49	45.05	85.85	842.19	695.64	319.81	375.83	4.50	2.66	3.26	1.00	4.50
34.05	317.02	3016.66	3094.37	43.32	39.63	388.77	696.66	320.30	376.37	6.37	1.81	3.05	1.00	6.37
34.10	316.97	2796.55	2916.06	54.21	60.95	597.92	697.69	320.79	376.90	5.89	2.44	3.14	1.00	5.89
34.15	316.92	3352.36	3454.97	45.61	52.33	513.36	698.71	321.28	377.43	7.30	1.65	2.98	1.00	7.30
34.20	316.87	4861.45	4952.31	37.06	46.34	454.60	699.73	321.77	377.96	11.25	0.87	2.68	1.00	11.25
34.25	316.82	4091.26	4163.16	62.40	36.67	359.73	700.76	322.26	378.50	9.15	1.80	2.91	1.00	9.15
34.30	316.77	2564.24	2678.89	62.58	58.47	573.59	701.78	322.75	379.03	5.22	3.17	3.25	1.00	5.22
34.35	316.72	2165.60	2320.43	44.78	78.96	774.60	702.80	323.24	379.56	4.26	2.77	3.29	1.00	4.26
34.40	316.67	2018.36	2179.23	21.82	82.04	804.81	703.82	323.73	380.09	3.88	1.48	3.20	1.00	3.88
34.45	316.62	1940.15	2106.21	14.23	84.69	830.81	704.85	324.22	380.63	3.68	1.02	3.15	1.00	3.68
34.50	316.57	1831.44	1987.64	14.32	79.66	781.46	705.87	324.71	381.16	3.36	1.12	3.20	1.00	3.36
34.55	316.52	1476.67	1651.16	13.11	88.99	872.99	706.89	325.20	381.69	2.47	1.39	3.36	1.00	2.47
34.60	316.47	1687.24	1869.15	15.11	92.77	910.07	707.92	325.69	382.22	3.04	1.30	3.27	1.00	3.04
34.65	316.42	1742.55	1894.63	15.39	77.56	760.86	708.94	326.18	382.76	3.10	1.30	3.26	1.00	3.10
34.70	316.37	2001.57	2164.93	10.86	83.31	817.27	709.96	326.67	383.29	3.80	0.75	3.09	1.00	3.80
34.75	316.32	1995.47	2124.85	16.51	65.98	647.26	710.99	327.16	383.82	3.68	1.17	3.18	1.00	3.68
34.80	316.27	1553.73	1708.11	16.36	78.73	772.34	712.01	327.65	384.35	2.59	1.64	3.38	1.00	2.59
34.85	316.22	1432.04	1593.59	12.17	82.39	808.25	713.03	328.14	384.89	2.29	1.38	3.40	1.00	2.29
34.90	316.17	1319.50	1481.60	9.22	82.67	810.99	714.05	328.64	385.42	1.99	1.20	3.43	1.00	1.99
34.95	316.12	1445.01	1610.84	26.04	84.57	829.63	715.08	329.13	385.95	2.32	2.91	3.53	1.00	2.32
35.00	316.07	1398.85	1559.23	15.16	81.79	802.36	716.10	329.62	386.48	2.18	1.80	3.46	1.00	2.18
35.05	316.02	1987.46	2076.89	15.11	45.61	447.43	717.12	330.11	387.02	3.51	1.11	3.19	1.00	3.51
35.10	315.97	1339.72	1472.51	11.33	67.72	664.33	718.15	330.60	387.55	1.95	1.50	3.47	1.00	1.95
35.15	315.92	1192.86	1357.53	9.87	83.98	823.84	719.17	331.09	388.08	1.64	1.55	3.55	1.00	1.64
35.20	315.87	1102.07	1278.74	7.04	90.10	883.88	720.19	331.58	388.61	1.44	1.26	3.57	1.00	1.44
35.25	315.82	1145.93	1327.78	5.32	92.74	909.78	721.22	332.07	389.15	1.56	0.88	3.48	1.00	1.56
35.30	315.77	1165.01	1340.23	5.10	89.36	876.62	722.24	332.56	389.68	1.59	0.83	3.46	1.00	1.59
35.35	315.72	1121.90	1305.73	5.59	93.75	919.69	723.26	333.05	390.21	1.49	0.96	3.51	1.00	1.49

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

35.40	315.67	1091.00	1277.75	6.56	95.24	934.30	724.28	333.54	390.74	1.42	1.19	3.56	1.00	1.42
35.45	315.62	1154.71	1348.28	10.14	98.72	968.44	725.31	334.03	391.28	1.59	1.63	3.57	1.00	1.59
35.50	315.57	1186.75	1367.26	11.15	92.06	903.11	726.33	334.52	391.81	1.64	1.74	3.57	1.00	1.64
35.55	315.52	1222.61	1420.67	12.01	101.01	990.91	727.35	335.01	392.34	1.77	1.73	3.54	1.00	1.77
35.60	315.47	1217.27	1414.08	8.47	100.37	984.63	728.38	335.50	392.87	1.75	1.24	3.48	1.00	1.75
35.65	315.42	1186.37	1387.69	8.29	102.67	1007.19	729.40	335.99	393.41	1.67	1.26	3.50	1.00	1.67
35.70	315.37	1185.61	1391.50	7.83	105.00	1030.05	730.42	336.48	393.94	1.68	1.18	3.49	1.00	1.68
35.75	315.32	1193.24	1399.99	8.86	105.44	1034.37	731.45	336.97	394.47	1.69	1.33	3.51	1.00	1.69
35.80	315.27	1222.99	1433.99	8.98	107.61	1055.65	732.47	337.46	395.00	1.78	1.28	3.48	1.00	1.78
35.85	315.22	1220.70	1432.94	8.66	108.24	1061.83	733.49	337.95	395.54	1.77	1.24	3.48	1.00	1.77
35.90	315.17	1221.47	1432.38	9.04	107.56	1055.16	734.51	338.45	396.07	1.76	1.29	3.49	1.00	1.76
35.95	315.12	1190.95	1403.46	8.72	108.38	1063.21	735.54	338.94	396.60	1.68	1.31	3.51	1.00	1.68
36.00	315.07	1237.11	1451.10	9.33	109.13	1070.57	736.56	339.43	397.13	1.80	1.31	3.48	1.00	1.80
36.05	315.02	1238.25	1446.65	9.50	106.28	1042.61	737.58	339.92	397.67	1.78	1.34	3.49	1.00	1.78
36.10	314.97	1245.50	1458.60	9.13	108.68	1066.15	738.61	340.41	398.20	1.81	1.27	3.47	1.00	1.81
36.15	314.92	1258.09	1473.90	8.14	110.06	1079.69	739.63	340.90	398.73	1.84	1.11	3.45	1.00	1.84
36.20	314.87	1252.75	1468.36	7.90	109.96	1078.71	740.65	341.39	399.26	1.82	1.09	3.45	1.00	1.82
36.25	314.82	1252.75	1469.97	8.20	110.78	1086.75	741.68	341.88	399.80	1.82	1.13	3.45	1.00	1.82
36.30	314.77	1235.96	1449.08	8.19	108.69	1066.25	742.70	342.37	400.33	1.76	1.16	3.47	1.00	1.76
36.35	314.72	1250.08	1458.34	8.38	106.21	1041.92	743.72	342.86	400.86	1.78	1.17	3.47	1.00	1.78
36.40	314.67	1239.01	1451.96	8.68	108.60	1065.37	744.74	343.35	401.39	1.76	1.23	3.48	1.00	1.76
36.45	314.62	1245.12	1461.99	8.26	110.60	1084.99	745.77	343.84	401.93	1.78	1.15	3.47	1.00	1.78
36.50	314.57	1282.88	1500.24	8.73	110.85	1087.44	746.79	344.33	402.46	1.87	1.16	3.45	1.00	1.87
36.55	314.52	1272.96	1491.06	9.05	111.23	1091.17	747.81	344.82	402.99	1.84	1.22	3.46	1.00	1.84
36.60	314.47	1281.36	1503.23	9.29	113.15	1110.00	748.84	345.31	403.52	1.87	1.23	3.46	1.00	1.87
36.65	314.42	1333.62	1557.82	9.61	114.34	1121.68	749.86	345.80	404.06	2.00	1.19	3.42	1.00	2.00
36.70	314.37	1295.47	1520.63	9.76	114.83	1126.48	750.88	346.29	404.59	1.90	1.27	3.45	1.00	1.90
36.75	314.32	1337.81	1563.95	9.76	115.33	1131.39	751.91	346.78	405.12	2.00	1.20	3.42	1.00	2.00
36.80	314.27	1330.95	1556.80	9.99	115.18	1129.92	752.93	347.27	405.65	1.98	1.24	3.43	1.00	1.98

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

36.85	314.22	1359.56	1585.41	10.01	115.18	1129.92	753.95	347.76	406.19	2.05	1.20	3.42	1.00	2.05
36.90	314.17	1386.26	1610.89	9.79	114.56	1123.83	754.97	348.26	406.72	2.10	1.14	3.40	1.00	2.10
36.95	314.12	1379.01	1603.45	9.76	114.46	1122.85	756.00	348.75	407.25	2.08	1.15	3.40	1.00	2.08
37.00	314.07	1366.04	1590.08	10.34	114.26	1120.89	757.02	349.24	407.78	2.04	1.24	3.42	1.00	2.04
37.05	314.02	1445.77	1662.91	10.40	110.74	1086.36	758.04	349.73	408.32	2.22	1.15	3.38	1.00	2.22
37.10	313.97	1427.84	1651.59	10.62	114.11	1119.42	759.07	350.22	408.85	2.18	1.19	3.39	1.00	2.18
37.15	313.92	1446.15	1669.41	10.44	113.86	1116.97	760.09	350.71	409.38	2.22	1.15	3.38	1.00	2.22
37.20	313.87	1475.53	1694.57	10.37	111.71	1095.88	761.11	351.20	409.91	2.28	1.11	3.36	1.00	2.28
37.25	313.82	1449.97	1668.03	10.01	111.21	1090.97	762.14	351.69	410.45	2.21	1.10	3.37	1.00	2.21
37.30	313.77	1566.70	1785.80	11.22	111.74	1096.17	763.16	352.18	410.98	2.49	1.10	3.32	1.00	2.49
37.35	313.72	1540.38	1757.95	11.01	110.96	1088.52	764.18	352.67	411.51	2.41	1.11	3.34	1.00	2.41
37.40	313.67	1569.75	1790.48	11.37	112.57	1104.31	765.20	353.16	412.04	2.49	1.11	3.32	1.00	2.49
37.45	313.62	1584.62	1806.17	12.06	112.99	1108.43	766.23	353.65	412.58	2.52	1.16	3.33	1.00	2.52
37.50	313.57	1598.36	1815.64	10.92	110.81	1087.05	767.25	354.14	413.11	2.54	1.04	3.31	1.00	2.54
37.55	313.52	1388.55	1603.52	9.76	109.63	1075.47	768.27	354.63	413.64	2.02	1.17	3.42	1.00	2.02
37.60	313.47	1391.60	1604.08	9.45	108.36	1063.01	769.30	355.12	414.17	2.02	1.13	3.41	1.00	2.02
37.60	313.42	1478.19	1676.90	8.27	101.34	994.15	770.32	355.61	414.71	2.19	0.91	3.35	1.00	2.19
37.70	313.37	1396.18	1607.20	8.40	107.62	1055.75	771.34	356.10	415.24	2.01	1.00	3.39	1.00	2.01
37.75	313.32	1453.02	1665.77	8.15	108.50	1064.39	772.37	356.59	415.77	2.15	0.91	3.35	1.00	2.15
37.80	313.27	1360.70	1573.12	7.78	108.33	1062.72	773.39	357.08	416.30	1.92	0.97	3.41	1.00	1.92
37.85	313.22	1388.93	1606.33	7.97	110.87	1087.63	774.41	357.57	416.84	2.00	0.96	3.39	1.00	2.00
37.90	313.17	1358.41	1576.10	7.60	111.02	1089.11	775.43	358.07	417.37	1.92	0.95	3.40	1.00	1.92
37.95	313.12	1413.35	1638.86	9.12	115.01	1128.25	776.46	358.56	417.90	2.06	1.06	3.39	1.00	2.06
38.00	313.07	1494.60	1721.96	9.87	115.95	1137.47	777.48	359.05	418.43	2.26	1.05	3.35	1.00	2.26
38.05	313.02	1641.46	1857.94	10.85	110.40	1083.02	778.50	359.54	418.97	2.58	1.01	3.29	1.00	2.58
38.10	312.97	1616.67	1845.79	12.32	116.85	1146.30	779.53	360.03	419.50	2.54	1.16	3.32	1.00	2.54
38.15	312.92	1679.99	1907.74	11.13	116.15	1139.43	780.55	360.52	420.03	2.68	0.99	3.27	1.00	2.68
38.20	312.87	1528.55	1757.93	10.90	116.98	1147.57	781.57	361.01	420.56	2.32	1.12	3.35	1.00	2.32
38.25	312.82	1509.48	1743.41	11.52	119.30	1170.33	782.60	361.50	421.10	2.28	1.20	3.37	1.00	2.28

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

38.30	312.77	1577.38	1807.72	11.64	117.47	1152.38	783.62	361.99	421.63	2.43	1.14	3.34	1.00	2.43
38.35	312.72	1597.98	1827.63	11.68	117.12	1148.95	784.64	362.48	422.16	2.47	1.12	3.33	1.00	2.47
38.40	312.67	1586.53	1818.93	12.43	118.52	1162.68	785.66	362.97	422.69	2.44	1.20	3.34	1.00	2.44
38.45	312.62	1623.92	1857.96	12.83	119.36	1170.92	786.69	363.46	423.23	2.53	1.20	3.33	1.00	2.53
38.50	312.57	1661.30	1895.56	13.76	119.47	1172.00	787.71	363.95	423.76	2.61	1.24	3.32	1.00	2.61
38.55	312.52	1658.25	1887.78	14.11	117.06	1148.36	788.73	364.44	424.29	2.59	1.28	3.33	1.00	2.59
38.60	312.47	1729.58	1957.29	14.31	116.13	1139.24	789.76	364.93	424.82	2.75	1.23	3.30	1.00	2.75
38.65	312.42	1694.11	1920.72	14.55	115.57	1133.74	790.78	365.42	425.36	2.66	1.29	3.32	1.00	2.66
38.70	312.37	1718.52	1949.35	14.85	117.72	1154.83	791.80	365.91	425.89	2.72	1.28	3.31	1.00	2.72
38.75	312.32	1773.07	2003.76	16.64	117.65	1154.15	792.83	366.40	426.42	2.84	1.37	3.31	1.00	2.84
38.80	312.27	1863.86	2067.24	21.13	103.72	1017.49	793.85	366.89	426.95	2.98	1.66	3.32	1.00	2.98
38.85	312.22	1937.48	2151.82	26.49	109.31	1072.33	794.87	367.38	427.49	3.17	1.95	3.33	1.00	3.17
38.90	312.17	2475.36	2664.87	36.21	96.65	948.14	795.89	367.88	428.02	4.37	1.94	3.21	1.00	4.37
38.95	312.12	2869.41	3029.63	42.84	81.71	801.58	796.92	368.37	428.55	5.21	1.92	3.14	1.00	5.21
39.00	312.07	3341.68	3510.29	77.15	85.99	843.56	797.94	368.86	429.08	6.32	2.84	3.15	1.00	6.32
39.05	312.02	6613.16	6676.75	92.90	32.43	318.14	798.96	369.35	429.62	13.68	1.58	2.73	1.00	13.68
39.10	311.97	7511.14	7511.98	110.34	0.43	4.22	799.99	369.84	430.15	15.60	1.64	2.69	1.00	15.60
39.15	311.92	6769.94	6765.06	121.80	-2.49	-24.43	801.01	370.33	430.68	13.85	2.04	2.79	1.00	13.85
39.20	311.87	8943.56	8971.48	147.45	14.24	139.69	802.03	370.82	431.21	18.95	1.80	2.64	1.00	18.95
39.25	311.82	8595.66	8587.17	141.88	-4.33	-42.48	803.06	371.31	431.75	18.03	1.82	2.66	1.00	18.03
39.30	311.77	9796.52	9799.93	152.96	1.74	17.07	804.08	371.80	432.28	20.81	1.70	2.59	1.00	20.81
39.35	311.72	9636.31	9627.17	164.86	-4.66	-45.71	805.10	372.29	432.81	20.38	1.87	2.63	1.00	20.38
39.40	311.67	10927.58	10919.38	148.37	-4.18	-41.01	806.12	372.78	433.34	23.34	1.47	2.52	1.00	23.34
39.45	311.62	11752.32	11747.59	145.39	-2.41	-23.64	807.15	373.27	433.88	25.22	1.33	2.47	1.00	25.22
39.50	311.57	9745.41	9734.70	130.01	-5.46	-53.56	808.17	373.76	434.41	20.55	1.46	2.56	1.00	20.55
39.55	311.52	12856.67	12863.87	70.81	3.67	36.00	809.19	374.25	434.94	27.72	0.59	2.26	0.93	30.86
39.60	311.47	12862.78	12855.60	71.51	-3.66	-35.90	810.22	374.74	435.47	27.66	0.59	2.26	0.93	30.74
39.65	311.42	11747.74	11758.80	83.46	5.64	55.33	811.24	375.23	436.01	25.11	0.76	2.35	0.96	26.57
39.70	311.37	12170.41	12201.84	92.18	16.03	157.25	812.26	375.72	436.54	26.09	0.81	2.34	0.96	27.64

Tableau A4-1 : Données brutes de terrain et calculs permettant la classification SBTn (Suite)

39.75	311.32	13240.81	13268.03	85.98	13.88	136.16	813.29	376.21	437.07	28.50	0.69	2.28	0.94	31.32
39.80	311.27	11885.07	11897.09	93.94	6.13	60.14	814.31	376.70	437.60	25.33	0.85	2.36	0.97	26.49
39.85	311.22	9571.46	9567.97	116.51	-1.78	-17.46	815.33	377.19	438.14	19.98	1.33	2.55	1.00	19.98
39.90	311.17	8905.79	8921.63	131.22	8.08	79.26	816.35	377.69	438.67	18.48	1.62	2.63	1.00	18.48
39.95	311.12	7917.02	7930.79	116.40	7.02	68.87	817.38	378.18	439.20	16.20	1.64	2.68	1.00	16.20
40.00	311.07	8543.01	8572.99	101.57	15.29	149.99	818.40	378.67	439.73	17.63	1.31	2.59	1.00	17.63
40.05	311.02	7508.47	7565.96	110.52	29.32	287.63	819.42	379.16	440.27	15.32	1.64	2.70	1.00	15.32
40.10	310.97	11304.09	11362.11	93.58	29.59	290.28	820.45	379.65	440.80	23.91	0.89	2.40	0.98	24.52
40.15	310.92	11772.16	11761.71	68.92	-5.33	-52.29	821.47	380.14	441.33	24.79	0.63	2.31	0.95	26.63
40.20	310.87	10797.50	10815.17	78.33	9.01	88.39	822.49	380.63	441.86	22.61	0.78	2.39	0.98	23.23
40.25	310.82	9665.30	9678.91	81.28	6.94	68.08	823.52	381.12	442.40	20.02	0.92	2.47	1.00	20.02
40.30	310.77	11490.63	11547.26	94.53	28.88	283.31	824.54	381.61	442.93	24.21	0.88	2.39	0.98	24.87
40.35	310.72	12873.46	12872.62	88.72	-0.43	-4.22	825.56	382.10	443.46	27.17	0.74	2.31	0.95	29.22
40.40	310.67	14527.89	14523.07	75.43	-2.46	-24.13	826.58	382.59	443.99	30.85	0.55	2.20	0.91	35.24
40.45	310.62	14243.32	14257.07	100.69	7.01	68.77	827.61	383.08	444.53	30.21	0.75	2.27	0.94	33.16
40.50	310.57	14636.99	14689.50	117.61	26.78	262.71	828.63	383.57	445.06	31.14	0.85	2.29	0.94	33.88
40.55	310.52	14396.29	14442.00	141.72	23.31	228.67	829.65	384.06	445.59	30.55	1.04	2.34	0.96	32.24
40.60	310.47	11330.80	11375.25	171.10	22.67	222.39	830.68	384.55	446.12	23.64	1.62	2.54	1.00	23.64
40.65	310.42	8879.09	8959.43	143.74	40.97	401.92	831.70	385.04	446.66	18.20	1.77	2.65	1.00	18.20
40.70	310.37	12881.85	12961.50	81.36	40.62	398.48	832.72	385.53	447.19	27.12	0.67	2.29	0.95	29.41
40.75	310.32	14183.05	14206.48	113.81	11.95	117.23	833.75	386.02	447.72	29.87	0.85	2.30	0.95	32.14
40.80	310.27	10896.30	10951.56	132.03	28.18	276.45	834.77	386.51	448.25	22.57	1.31	2.50	1.00	22.57
40.85	310.22	14259.34	14351.38	126.96	46.94	460.48	835.79	387.00	448.79	30.12	0.94	2.32	0.96	32.04
40.90	310.17	16433.72	16463.49	149.33	15.18	148.92	836.81	387.50	449.32	34.78	0.96	2.27	0.94	38.05
40.95	310.12	16722.11	16752.19	233.96	15.34	150.49	837.84	387.99	449.85	35.38	1.47	2.37	0.98	36.58
41.00	310.07	16635.90	16697.33	470.58	31.33	307.35	838.86	388.48	450.38	35.21	2.97	2.56	1.00	35.21
41.05	310.02	18044.28	18092.01	690.08	24.34	238.78	839.88	388.97	450.92	38.26	4.00	2.62	1.00	38.26
41.10	309.97	23617.17	23664.74	0.00	24.26	237.99	840.91	389.46	451.45	50.56	0.00	2.51	1.00	50.56
41.15	309.92	29821.01	29853.05	0.00	16.34	160.30	841.93	389.95	451.98	64.19	0.00	2.44	1.00	64.19

ANNEXE 5 – VALIDATION DES CORRÉLATIONS POUR LES RÉSIDUS MINIER

Classification SBTn sur données de CPT en laboratoire

Tableau A5-1 : Calculs de classification SBTn pour le CPT en laboratoire

σ'_{vo} (kN/m ³)	q_c (kPa)	f_s (kPa)	Q_t	F_r (%)	I_c	n	Q_{tn}
23.6	481.2193	9.8684	19.3906	2.1564	2.6789	0.8824	16.3646
36.98	832.0287	12.3775	21.4994	1.5568	2.5619	0.8445	18.4199
67.36	1046.834	14.7608	14.5408	1.5070	2.6979	0.9115	14.0417
73.79	1072.061	15.1434	13.5285	1.5169	2.7262	0.9255	13.2260
109.82	1151.787	16.2648	9.4879	1.5609	2.8656	0.9967	9.4908

Densité relative

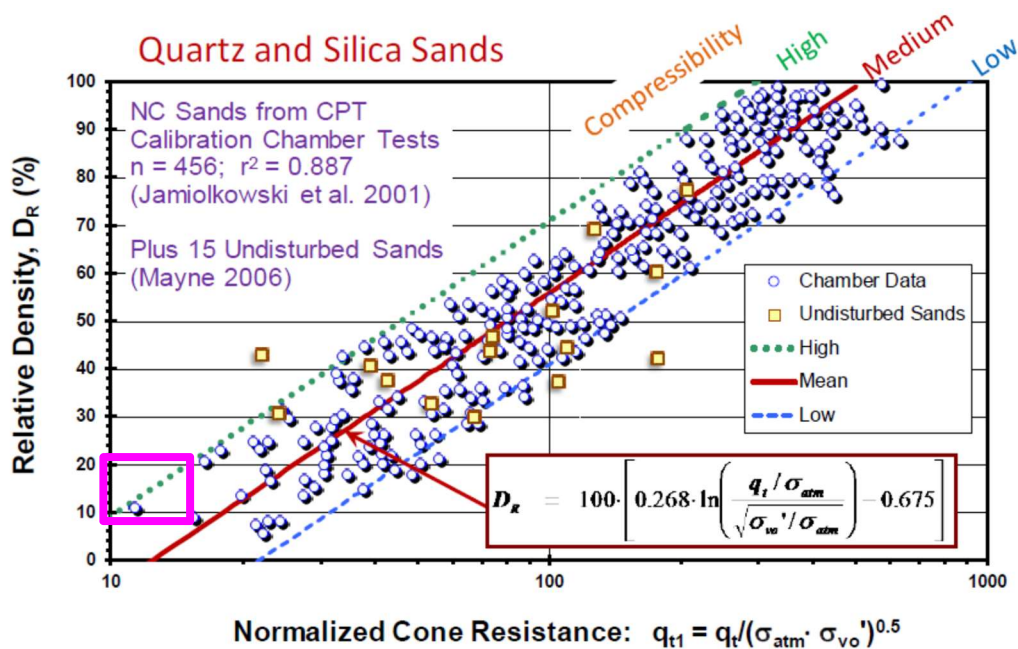


Figure A5-1 : D_r obtenus (en rose) à partir des essais CPT en laboratoire sur le graphique de Mayne (2006)

Angle de frottement interne effectif

Tableau A5-2 : Application de la méthode de Senneset et al. (1988, 1989) sur les données
SCPT16-67 des résidus de Canadian Malartic

Nm	Bq	Nm	Bq	Nm	Bq	Nm	Bq
5.29	0.038748	3.82	0.018866	3.57	0.146428	5.54	0.062817
4.57	0.056126	2.63	0.146774	3.37	0.162264	5.89	0.069071
4.09	0.077334	2.71	0.176357	3.34	0.148442	6.44	0.040674
3.63	0.103886	2.50	0.198913	3.54	0.143272	4.27	0.150058
3.49	0.130588	2.89	0.182466	3.93	0.075514	5.85	0.061879
3.29	0.120379	2.96	0.171758	3.89	0.086561	7.39	0.030582
3.31	0.128936	2.80	0.189131	3.50	0.13277	7.79	0.066692
4.40	0.095832	2.57	0.216227	3.31	0.174929	11.16	0.047143
3.73	0.096052	2.64	0.227141	3.33	0.167931	9.95	0.042644
4.37	0.092853	2.53	0.233626	3.38	0.159503	10.73	0.04758
3.40	0.083497	2.39	0.270751	3.62	0.138382	12.37	0.01668
2.06	0.377155	2.36	0.246205	3.75	0.126684	10.01	0.013844
3.15	0.171821	2.39	0.268106	4.11	0.127115	13.93	0.017372
2.93	0.154793	3.36	0.213192	4.39	0.095933	9.91	0.021073
2.30	0.324131	5.76	0.026522	4.21	0.101448	8.17	0.02172
2.35	0.297663	4.26	0.075178	4.10	0.112346	6.18	0.103225
3.43	0.046845	3.80	0.120783	9.78	0.059051	4.13	0.171854
2.66	0.147613	3.61	0.130278	7.52	0.035591	4.63	0.128974
2.62	0.175956	3.48	0.15426	6.85	0.055248	4.15	0.140508
3.09	0.148495	3.34	0.163581	5.98	0.039528	2.76	0.289387
3.34	0.138663	5.04	0.058806	6.91	0.061613	3.66	0.148068
3.49	0.131756	3.80	0.061479	7.60	0.053659	3.65	0.17218
2.87	0.190471	3.43	0.140856	8.61	0.030405	4.47	0.112554
3.08	0.159605	4.00	0.116543	8.24	0.010282	4.06	0.08411
2.57	0.192004	4.03	0.09592	7.75	0.0168	4.51	0.055481
2.60	0.223061	3.91	0.12325	7.58	0.040083	3.96	0.126268
2.98	0.173937	3.83	0.101814	7.54	0.044273	4.74	0.129811
2.37	0.232699	3.46	0.141719	9.43	0.02221	6.49	0.020469
1.74	0.355667	3.50	0.143843	9.47	0.013544	3.29	0.218953
2.24	0.276408	3.44	0.155557	8.94	0.025506	3.37	0.217875
2.42	0.277659	3.31	0.157236	10.00	0.005818	3.97	0.132324
2.92	0.218989	3.14	0.170803	10.03	0.007268	3.63	0.151086
2.97	0.195579	3.08	0.18475	12.60	0.00228	3.22	0.205234
2.55	0.243173	3.31	0.176782	6.62	0.043254	3.54	0.16881
2.24	0.264497	4.11	0.118695	7.31	0.047666	3.93	0.145496
2.53	0.203018	3.83	0.120212	7.14	0.018855	3.39	0.100735

Tableau A5-2 : Application de la méthode de Senne set et al. (1988, 1989) sur les données SCPT16-67 des résidus de Canadian Malartic (Suite)

Nm	Bq	Nm	Bq	Nm	Bq	Nm	Bq
3.53	0.138819	20.37	0.006065	3.77	0.166522	7.46	0.025741
4.83	0.135698	11.03	0.017548	3.39	0.18866	4.58	0.096319
3.49	0.196995	9.75	0.026322	2.77	0.298354	3.41	0.186507
3.17	0.239004	9.83	0.062498	3.98	0.202688	3.06	0.251245
3.63	0.144192	8.31	0.077263	3.67	0.146244	3.14	0.242374
2.89	0.231937	10.63	0.027144	3.08	0.226944	3.17	0.241576
2.04	0.375332	7.50	0.000469	3.26	0.213684	3.26	0.205226
3.22	0.108035	5.41	0.068056	3.51	0.208975	2.89	0.247285
4.49	0.09557	4.59	0.116859	4.45	0.057351	3.55	0.212319
4.46	0.117445	4.75	0.107484	3.98	0.128536	3.49	0.150756
3.70	0.19044	4.82	0.129518	5.21	0.132061	3.48	0.091344
4.55	0.14133	4.87	0.133112	11.57	0.01693	2.73	0.212809
8.84	0.04655	3.78	0.188	21.52	0.009137	2.53	0.281111
7.68	0.034747	4.32	0.160758	23.35	0.000746	3.36	0.193093
4.86	0.056976	4.26	0.121949	21.43	0.00363	3.48	0.166912
3.43	0.165237	3.56	0.238939	21.91	0.005461	3.40	0.211959
3.22	0.173547	4.44	0.115383	25.54	0.006459	3.51	0.202268
2.82	0.238005	5.58	0.106447	26.72	0.006142	5.36	0.098402
3.09	0.201396	4.70	0.108349	29.95	0.005798	4.49	0.182133
3.29	0.177062	4.47	0.160797	35.32	0.002529	4.84	0.138578
3.38	0.170738	4.65	0.13763	29.74	0.003103	4.58	0.158007
2.92	0.218539	4.74	0.150001	22.03	0.008667	3.76	0.200434
2.95	0.225222	4.28	0.111318	18.25	0.013897	2.94	0.264709
3.01	0.215734	3.84	0.168324	18.85	0.011609	2.31	0.318297
3.01	0.220043	3.99	0.173389	20.53	0.01661	2.95	0.238133
2.84	0.243999	3.56	0.19929	18.12	0.022913	3.39	0.213639
3.10	0.190027	3.93	0.059934	17.89	0.023965	3.13	0.251835
3.30	0.124224	3.02	0.20401	17.03	0.020052	3.60	0.199342
2.98	0.182281	10.55	0.065129	14.29	0.01577	3.07	0.232144
2.94	0.213094	8.32	0.046224	11.19	0.021521	1.96	0.430269
3.08	0.216777	6.15	0.124061	9.14	0.034092	2.07	0.215663
3.26	0.163139	7.27	0.081579	7.26	0.053631	1.85	0.415254
2.59	0.253357	5.62	0.085127	5.89	0.082545	2.55	0.282963
2.64	0.257964	4.86	0.158132	4.18	0.152275	2.46	0.28321
2.99	0.222139	8.10	0.044597	3.82	0.211572	2.44	0.361072
3.25	0.209039	4.22	0.125755	11.42	0.031519	4.47	0.18611
8.03	0.095901	3.01	0.230481	7.44	0.016177	4.97	0.095421
23.14	0.013739	3.93	0.132496	7.87	0.065733	3.20	0.251223

Tableau A5-2 : Application de la méthode de Senne set et al. (1988, 1989) sur les données SCPT16-67 des résidus de Canadian Malartic (Suite)

Nm	Bq	Nm	Bq	Nm	Bq	Nm	Bq
2.69	0.286029	5.80	0.128926	2.81	0.342436	2.12	0.438256
2.85	0.324628	5.49	0.113529	3.41	0.217062	2.32	0.401368
2.70	0.228109	3.61	0.241561	3.26	0.264174	2.89	0.28307
2.47	0.327462	3.12	0.333018	2.85	0.288299	3.13	0.267749
2.47	0.331396	6.23	0.102244	2.97	0.275756	3.12	0.282284
4.11	0.176721	7.15	0.089957	3.17	0.273337	3.24	0.270137
3.84	0.158229	6.42	0.108972	3.72	0.223647	3.49	0.244988
2.59	0.293673	7.20	0.067727	3.23	0.260963	3.29	0.275368
2.19	0.397053	5.26	0.139274	2.19	0.465135	3.28	0.273039
3.22	0.247931	4.04	0.194053	2.54	0.383054	2.88	0.345208
3.13	0.254084	4.12	0.17674	2.72	0.315898	3.11	0.293797
3.22	0.271074	3.71	0.246006	2.32	0.453009	2.66	0.359335
3.86	0.126984	4.99	0.141522	3.42	0.235615	2.31	0.409979
3.65	0.140946	4.50	0.183721	2.82	0.333491	1.95	0.504521
2.97	0.27509	7.53	0.059888	2.97	0.207705	1.70	0.670475
2.33	0.352793	12.46	0.04485	3.47	0.196986	2.14	0.512345
6.43	0.126745	23.96	1.68E-05	2.94	0.215013	3.07	0.162448
5.25	0.116143	13.40	0.023189	3.79	0.174114	1.70	0.56638
3.91	0.203831	16.75	0.051447	3.93	0.194475	1.75	0.615372
2.73	0.350689	10.96	0.027931	4.17	0.205556	1.79	0.581661
2.33	0.397775	7.09	0.093815	4.99	0.154238	1.98	0.520885
4.05	0.249546	9.00	0.022688	4.80	0.174663	2.11	0.479586
11.72	0.000964	10.65	0.021323	3.20	0.292991	2.08	0.471626
8.29	0.051861	11.63	0.030483	2.23	0.464249	2.01	0.48711
6.42	0.103443	10.57	0.046083	1.73	0.628301	2.09	0.458288
7.05	0.089563	8.44	0.064129	2.09	0.480142	2.12	0.455348
10.10	0.030398	10.55	0.03376	1.96	0.527066	2.30	0.40712
11.78	0.036405	7.96	0.043699	2.23	0.419742	1.96	0.510622
11.65	0.032373	4.26	0.186812	2.07	0.438764	2.18	0.481738
9.04	0.066683	4.36	0.216471	1.90	0.512883	1.55	0.729906
10.44	0.041478	2.91	0.258277	2.11	0.448957	1.63	0.80613
9.85	0.025784	2.38	0.418793	2.21	0.392805	1.81	0.717104
9.94	0.020891	3.27	0.125485	2.04	0.461365	1.80	0.741697
6.01	0.093271	3.33	0.2027	2.17	0.401814	1.90	0.722049
4.34	0.185433	4.11	0.153023	2.90	0.189683	2.03	0.668646
3.41	0.239426	3.79	0.192886	2.59	0.283701	1.91	0.740418
5.95	0.141711	3.39	0.241416	2.32	0.364395	2.07	0.530092
5.37	0.0708	2.48	0.370074	2.18	0.386724	1.87	0.723231

Tableau A5-2 : Application de la méthode de Senne set et al. (1988, 1989) sur les données SCPT16-67 des résidus de Canadian Malartic (Suite)

Nm	Bq	Nm	Bq	Nm	Bq	Nm	Bq
2.02	0.694399	2.37	0.398797	3.88	0.326069	1.76	1.024768
1.94	0.744363	2.12	0.603444	3.68	0.361496	1.78	0.978229
1.93	0.743554	2.12	0.619986	3.36	0.356346	1.76	1.020933
1.92	0.763615	1.99	0.683028	2.47	0.58012	1.78	1.034801
1.90	0.76089	2.11	0.662932	3.04	0.503244	1.87	0.986276
1.95	0.753373	3.28	0.454936	3.10	0.366605	1.84	1.004164
1.75	0.823856	4.01	0.453636	3.80	0.337189	1.87	1.013651
1.84	0.768623	4.76	0.416071	3.68	0.226402	2.00	0.960284
1.89	0.757646	6.21	0.30776	2.59	0.446429	1.90	1.013562
1.93	0.747393	6.55	0.188445	2.29	0.545222	2.00	0.966205
2.00	0.678235	6.65	0.203526	1.99	0.62844	1.98	0.973592
2.12	0.592111	9.24	0.170322	2.32	0.55875	2.05	0.940699
2.05	0.609398	8.60	0.017635	2.18	0.560704	2.10	0.906136
1.97	0.636488	7.54	0.078229	3.51	0.086285	2.08	0.913455
2.03	0.601365	5.89	0.173677	1.95	0.442409	2.04	0.926285
2.06	0.609592	9.85	0.159265	1.64	0.771908	2.22	0.814077
2.21	0.564738	9.43	0.008021	1.44	0.988818	2.18	0.861828
2.23	0.533908	7.00	0.069528	1.56	0.952435	2.22	0.842672
2.11	0.404765	4.40	0.288398	1.59	0.880372	2.28	0.797758
1.89	0.627649	3.80	0.521479	1.49	1.007162	2.21	0.816075
2.24	0.528167	3.81	0.503324	1.42	1.08546	2.49	0.727516
1.93	0.674743	3.93	0.408449	1.59	1.018358	2.41	0.740459
1.91	0.704906	3.30	0.375503	1.64	0.887124	2.49	0.732633
1.92	0.700124	3.92	0.435684	1.77	0.946023	2.52	0.725788
1.93	0.711503	6.13	0.107749	1.75	0.946661	2.54	0.699077
2.10	0.641587	5.65	0.122274	1.67	1.019613	2.02	0.863029
2.01	0.674962	5.66	0.189159	1.68	1.04915	2.02	0.847996
2.00	0.694076	6.18	0.095061	1.69	1.043151	2.19	0.704331
1.92	0.739357	5.70	0.125475	1.78	1.023753	2.01	0.837039
1.88	0.734244	4.60	0.205971	1.77	1.034929	2.15	0.792241
1.91	0.744698	4.50	0.308582	1.76	1.02702	1.92	0.882341
2.00	0.666651	6.37	0.028558	1.68	1.084358	2.00	0.877565
2.03	0.678597	5.89	0.124926	1.80	1.023238	1.92	0.91304
2.07	0.667594	7.30	0.069689	1.78	0.991011	2.06	0.892493
2.01	0.705565	11.25	0.031235	1.81	1.007982	2.26	0.824184
2.15	0.66355	9.15	0.010823	1.84	1.006158	2.58	0.670248
2.16	0.644298	5.22	0.126873	1.82	1.013204	2.54	0.737406
2.17	0.62971	4.26	0.279025	1.82	1.022762	2.68	0.691022

Tableau A5-2 : Application de la méthode de Senneset et al. (1988, 1989) sur les données SCPT16-67 des résidus de Canadian Malartic (Suite)

Nm	Bq	Nm	Bq	Nm	Bq	Nm	Bq
2.32	0.805614	2.53	0.753737	2.72	0.681545	5.21	0.194028
2.28	0.841824	2.61	0.729385	2.84	0.650524	6.32	0.175016
2.43	0.771791	2.59	0.713267	2.98	0.510919	18.20	0.002076
2.47	0.75405	2.75	0.663195	3.17	0.519509	29.41	0.001068
2.44	0.773967	2.66	0.679962	4.37	0.31047	32.04	0.005436

Chen et Juang (1996)

Tableau A5-3 : Application de l'équation de Chen et Juang (1996) sur les résidus en laboratoire

σ'_{vo} (kPa)	q_c (kPa)	ϕ' (rad)	ϕ' (°)
23.6	481.2194	0.62	35.4
36.98	832.0288	0.62	35.5
67.36	1046.8347	0.57	32.7
73.79	1072.0610	0.56	32.2
109.82	1151.7873	0.52	29.8*
		Moyenne	33.9

*cette valeur a été ignorée dans le calcul de la moyenne car elle est jugée trop faible comparée aux autres données. Il est possible que les résidus n'étaient pas complètement consolidés ou qu'un problème est survenu durant la lecture de q_c

ANNEXE 6 – RÉSULTATS CPT_u SUR LE TERRAIN DE 2013

CPT13-01

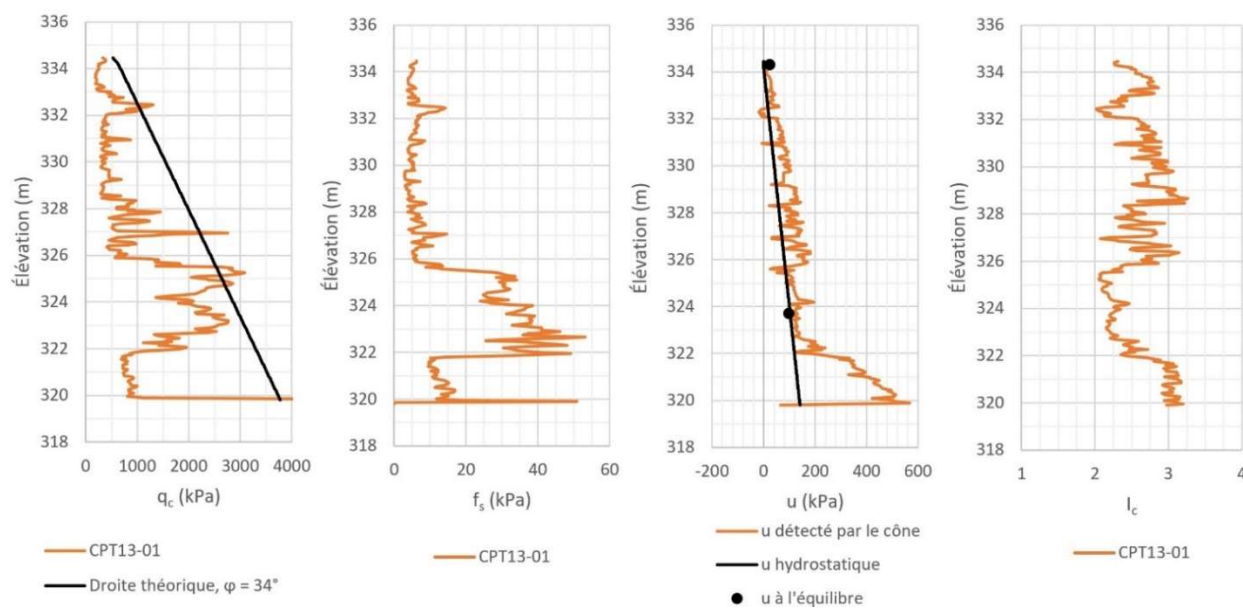


Figure A6-1 : Résultats de l'essai CPT13-01

CPT13-02

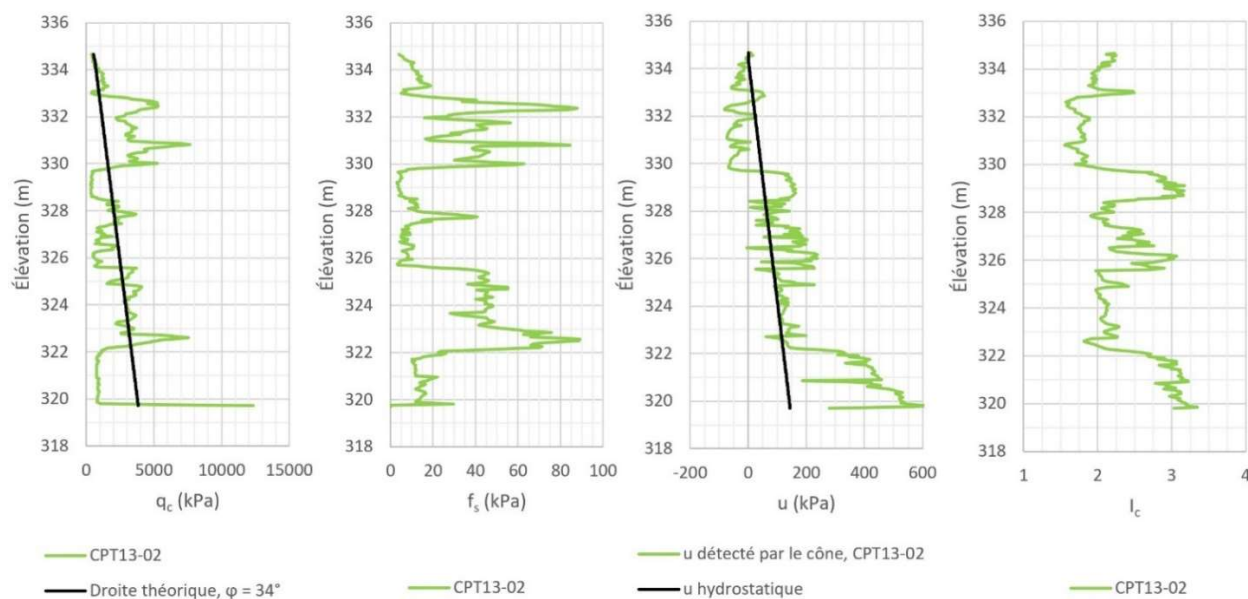


Figure A6-2 : Résultats de l'essai CPT13-02

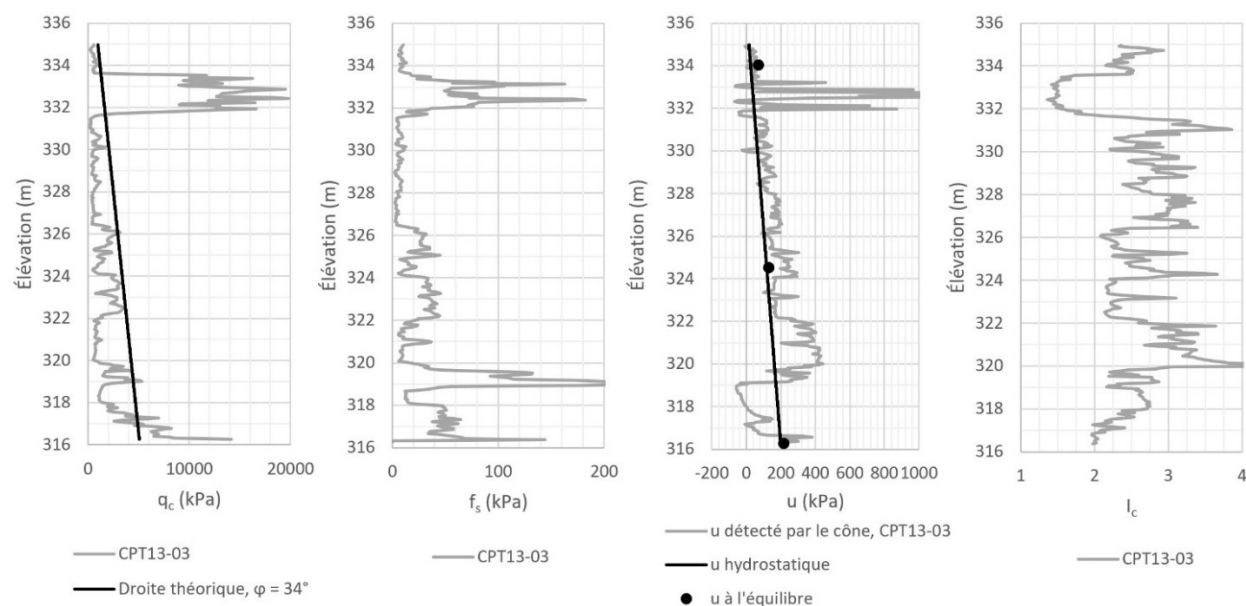
CPT13-03

Figure A6-3 : Résultats de l'essai CPT13-03

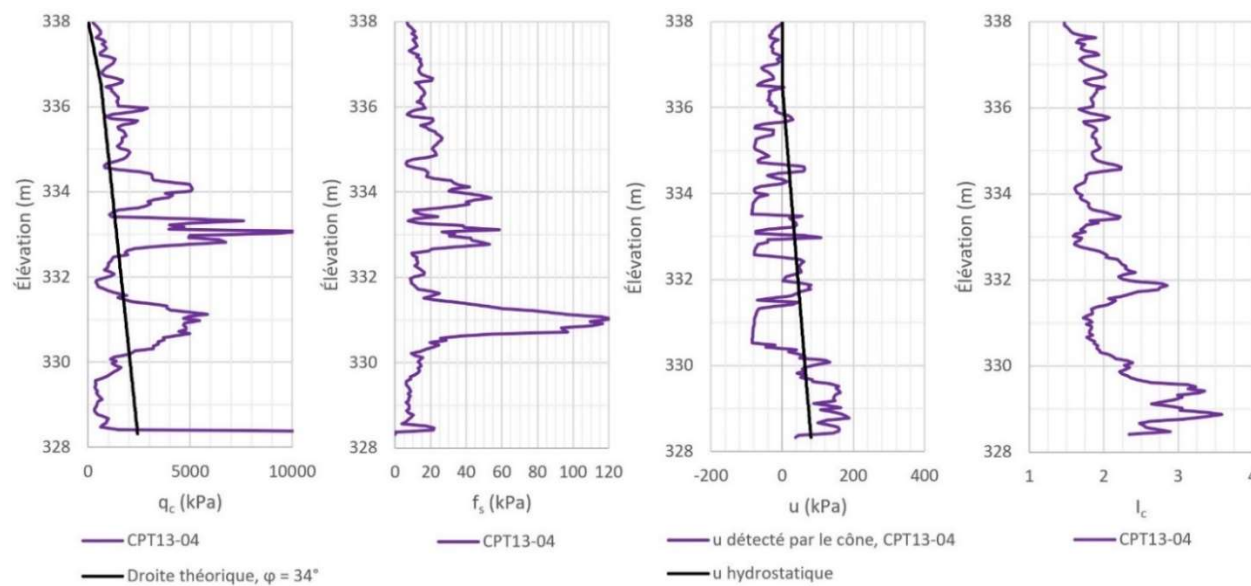
CPT13-04

Figure A6-4 : Résultats de l'essai CPT13-04

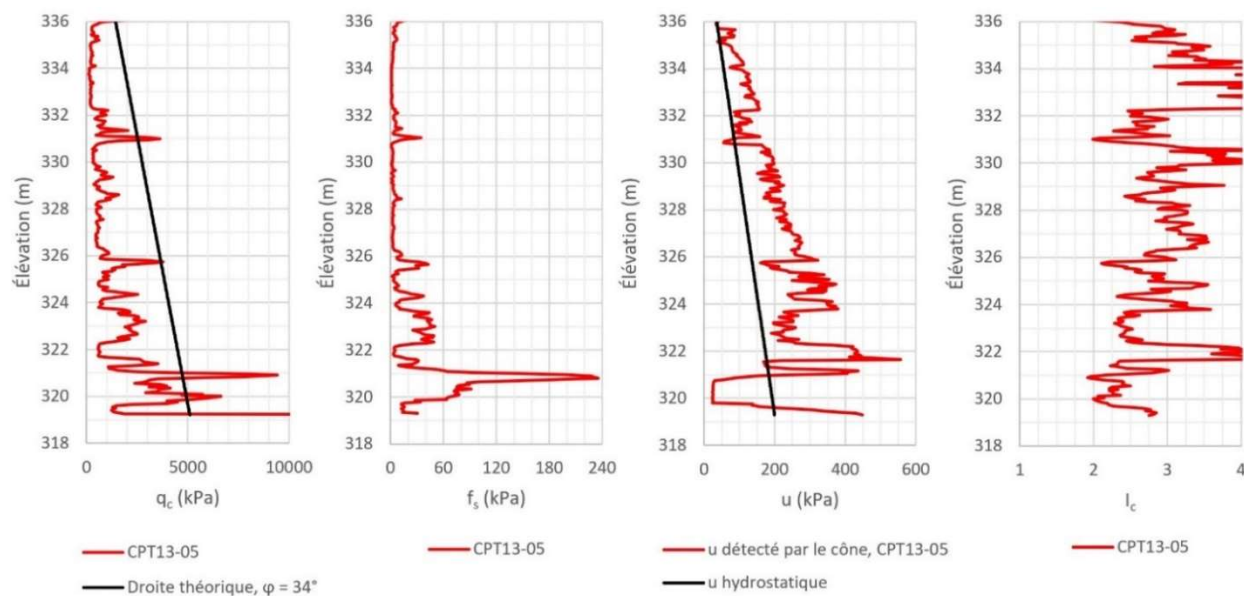
CPT13-05

Figure A6-5 : Résultats de l'essai CPT13-05

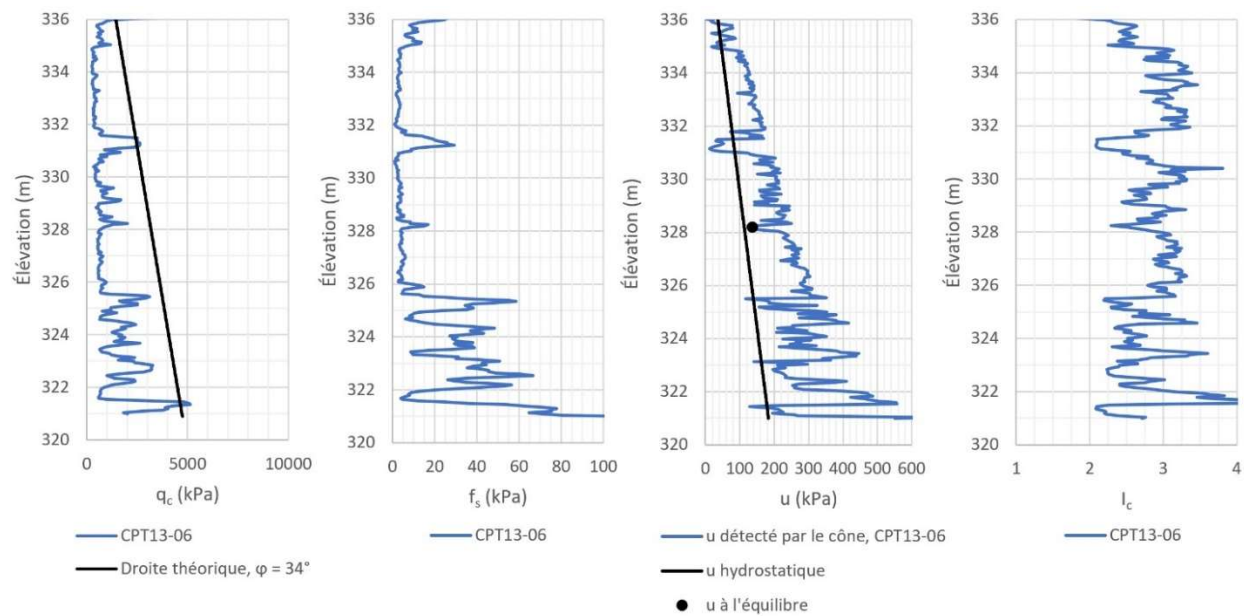
CPT13-06

Figure A6-6 : Résultats de l'essai CPT13-06

ANNEXE 7 – RÉSULTATS CPT_u ET SCPT_u SUR LE TERRAIN DE 2016

SCPT16-66

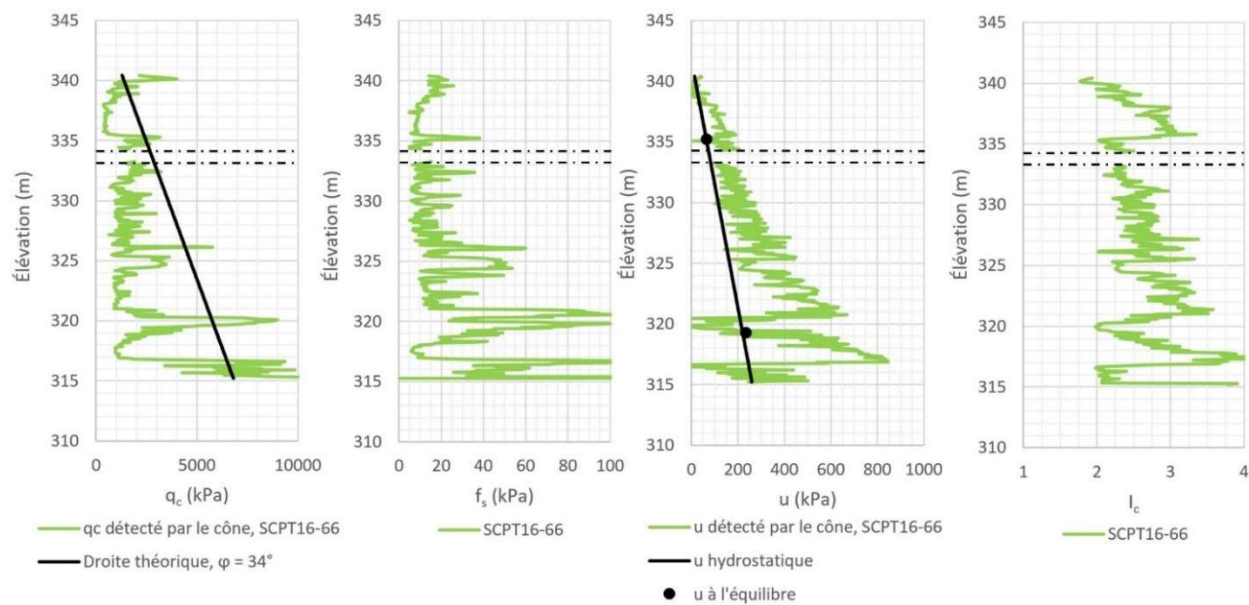


Figure A7-1 : Résultats de l'essai SCPT16-66

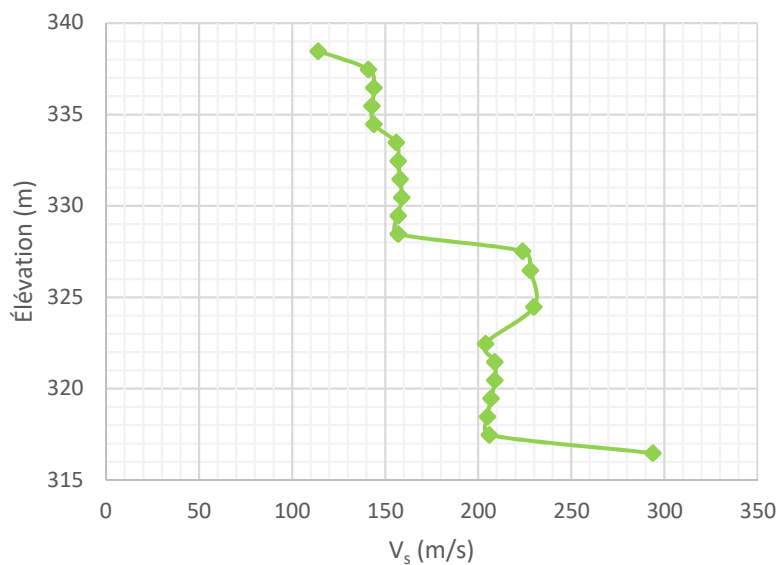


Figure A7-2 : Lectures de vitesses d'ondes de cisaillement de l'essai SCPT16-66

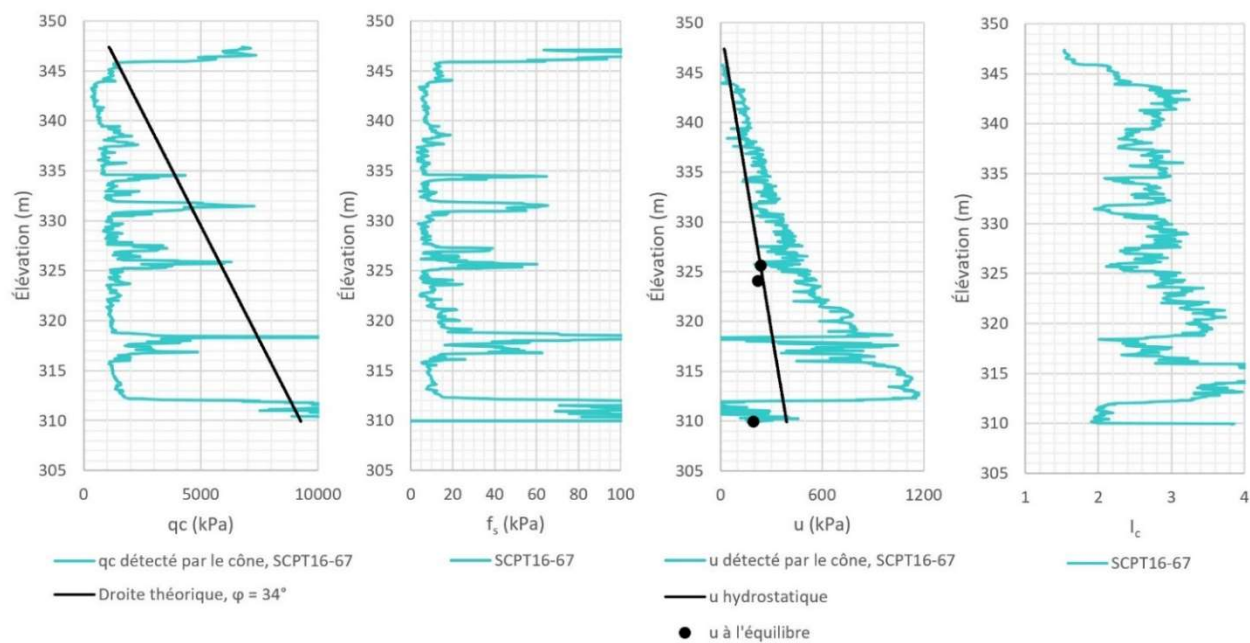
SCPT16-67

Figure A7-3 : Résultats de l'essai SCPT16-67

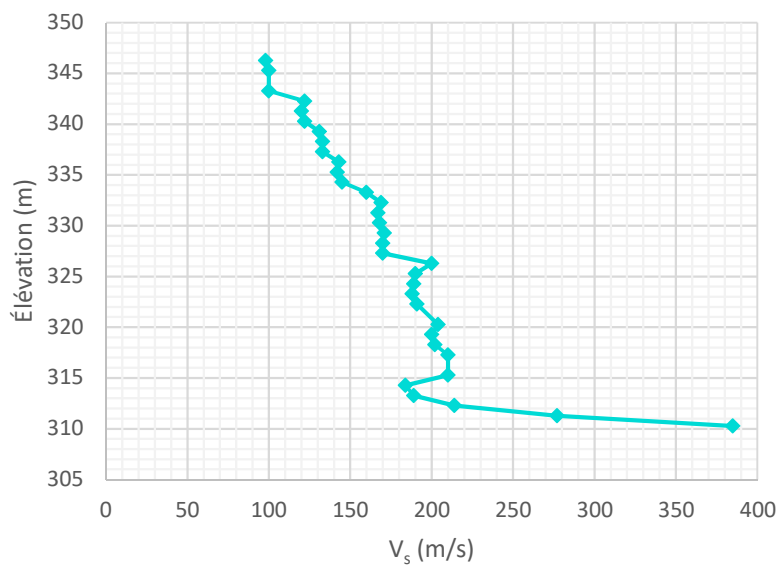


Figure A7-4 : Lectures de vitesses d'ondes de cisaillement de l'essai SCPT16-67

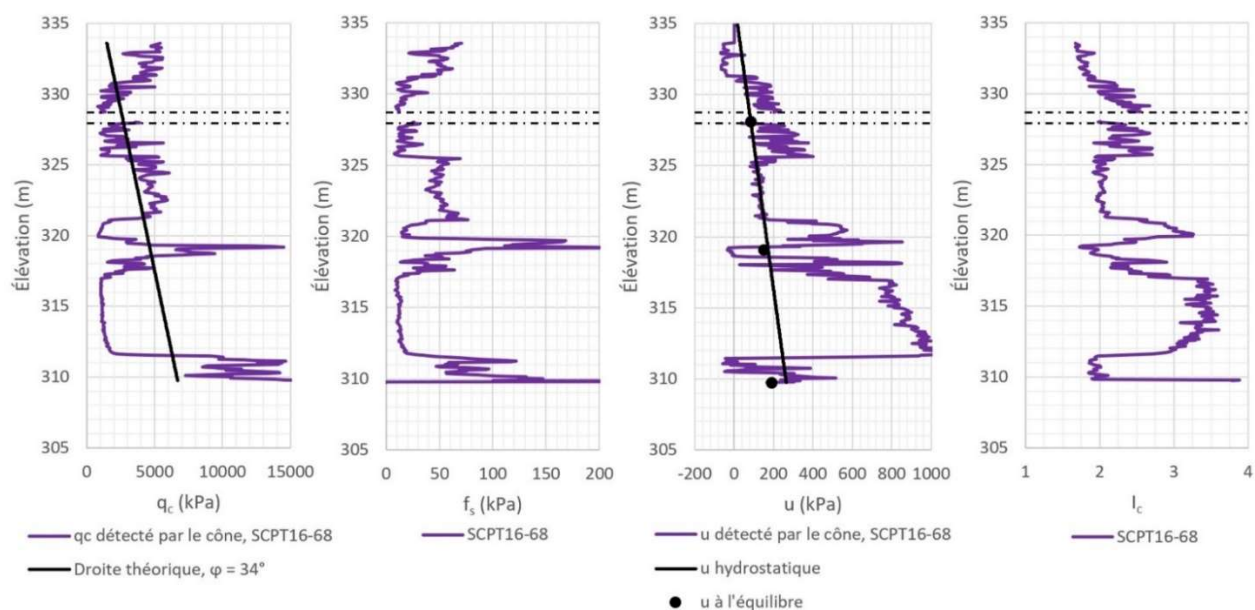
SCPT16-68

Figure A7-5 : Résultats de l'essai SCPT16-68

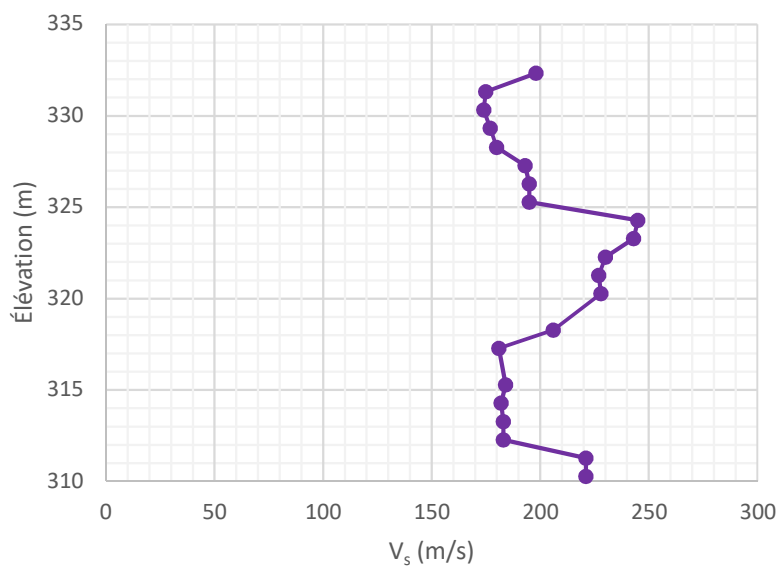


Figure A7-6 : Lectures de vitesses d'ondes de cisaillement de l'essai SCPT16-68

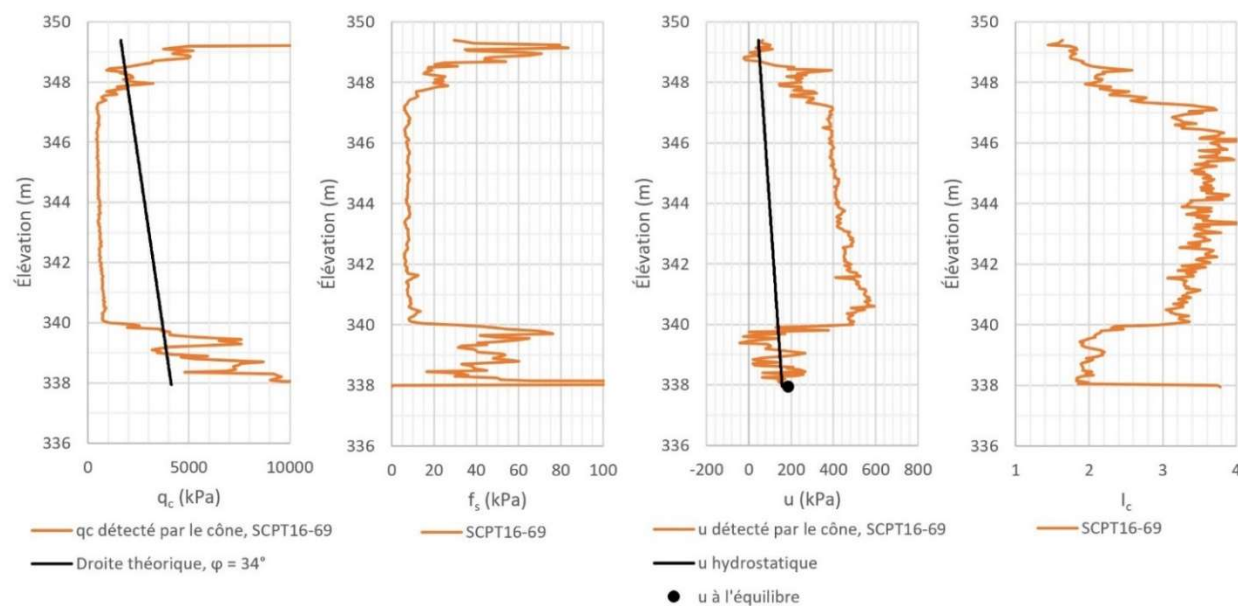
SCPT16-69

Figure A7-7 : Résultats de l'essai SCPT16-69

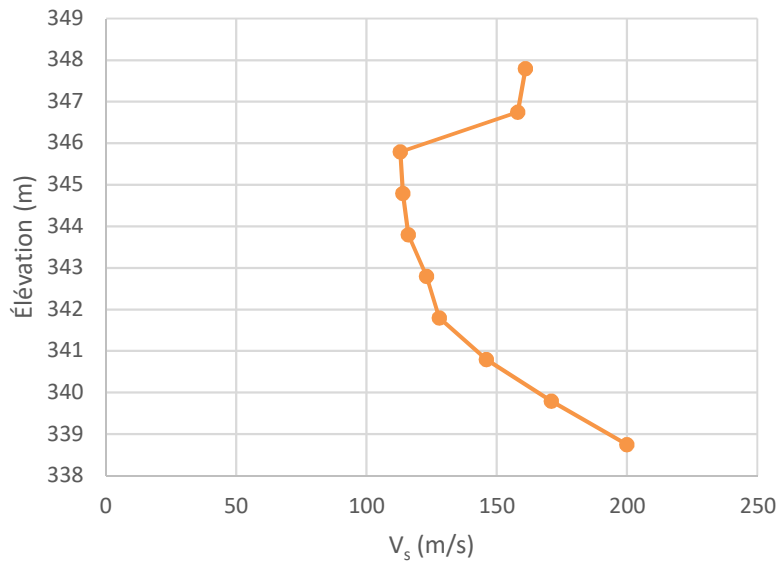


Figure A7-8 : Lectures de vitesses d'ondes de cisaillement de l'essai SCPT16-69

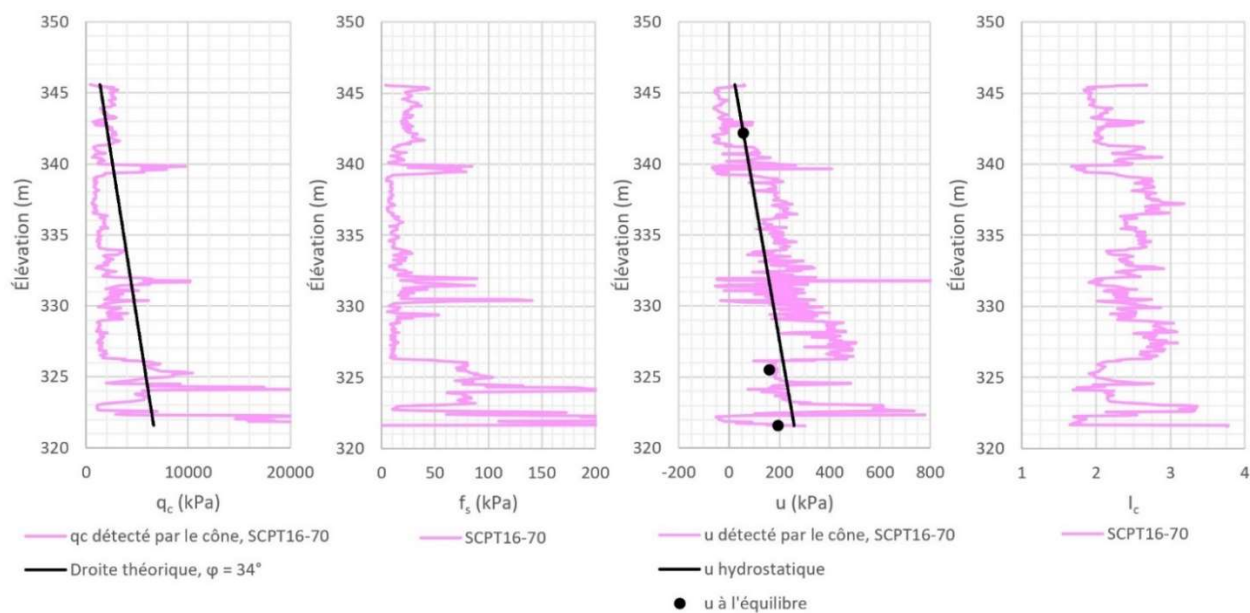
SCPT16-70

Figure A7-9 : Résultats de l'essai SCPT16-70

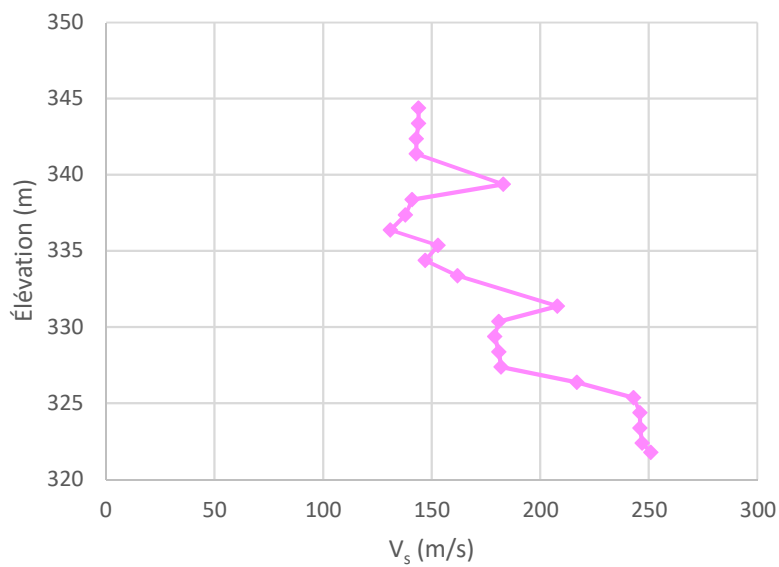


Figure A7-10 : Lectures de vitesses d'ondes de cisaillement de l'essai SCPT16-70

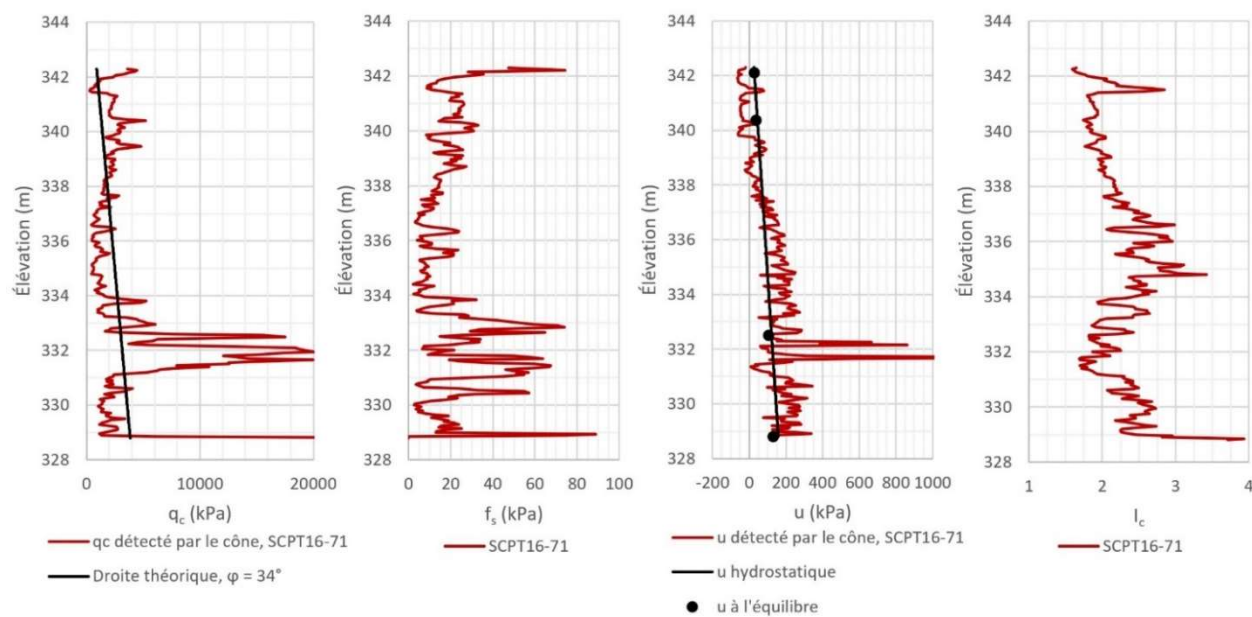
SCPT16-71

Figure A7-11 : Résultats de l'essai SCPT16-71

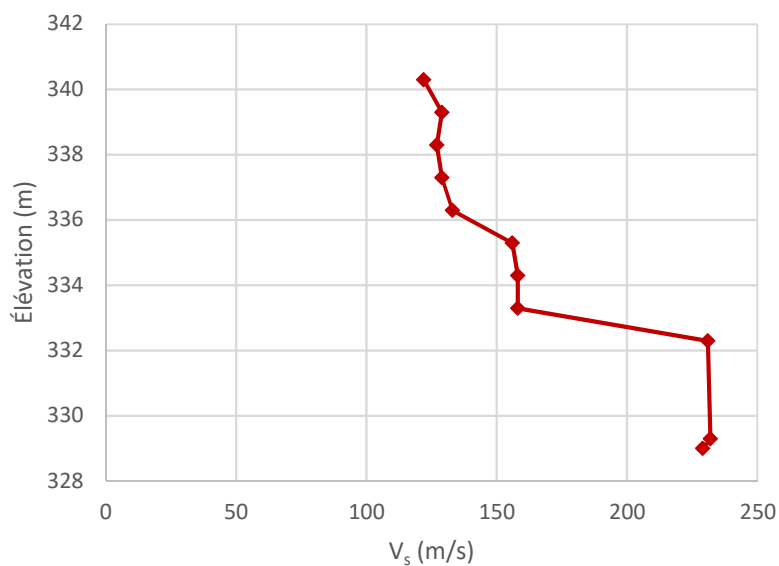


Figure A7-12 : Lectures de vitesses d'ondes de cisaillement de l'essai SCPT16-71

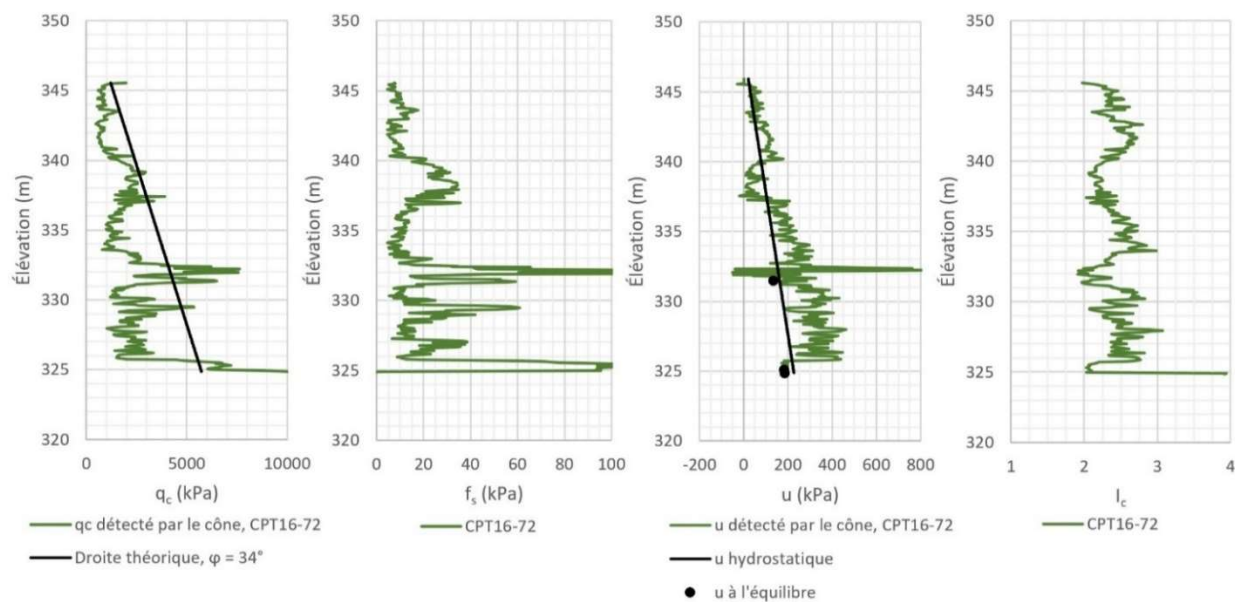
CPT16-72

Figure A7-13 : Résultats de l'essai CPT16-72

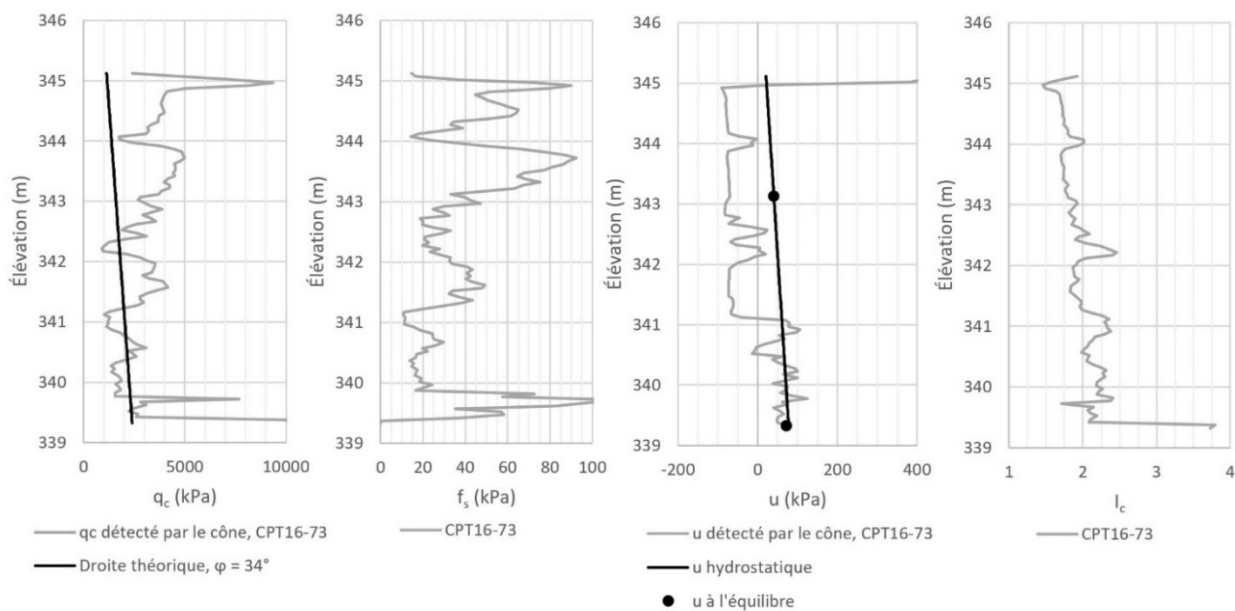
CPT16-73

Figure A7-14 : Résultats de l'essai CPT16-73

ANNEXE 8 – PARAMÈTRES DE CARACTÉRISATION DES CPT_u DE 2013

Poids volumique

CPT13-01

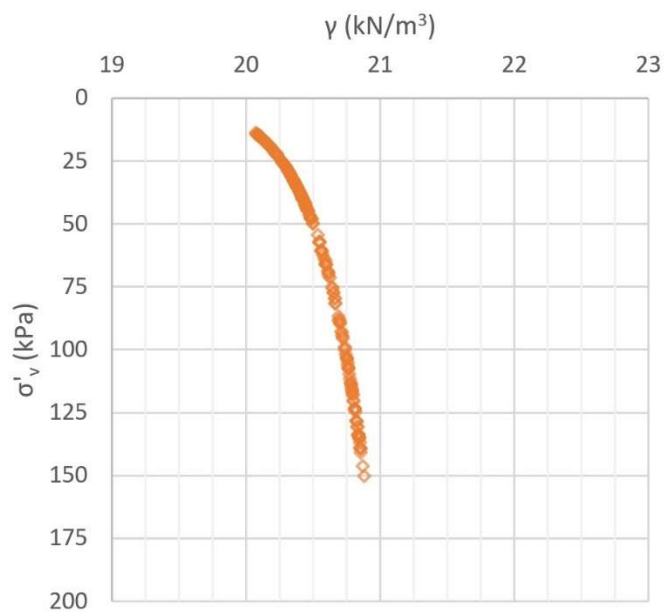


Figure A8-1 : Poids volumique en fonction des contraintes effectives *in situ* du CPT13-01

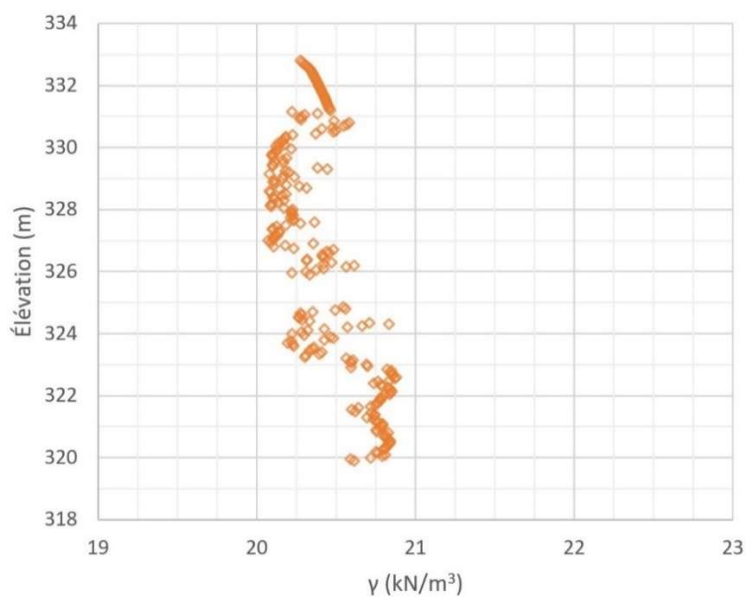


Figure A8-2 : Poids volumique en fonction de l'élévation du CPT13-01

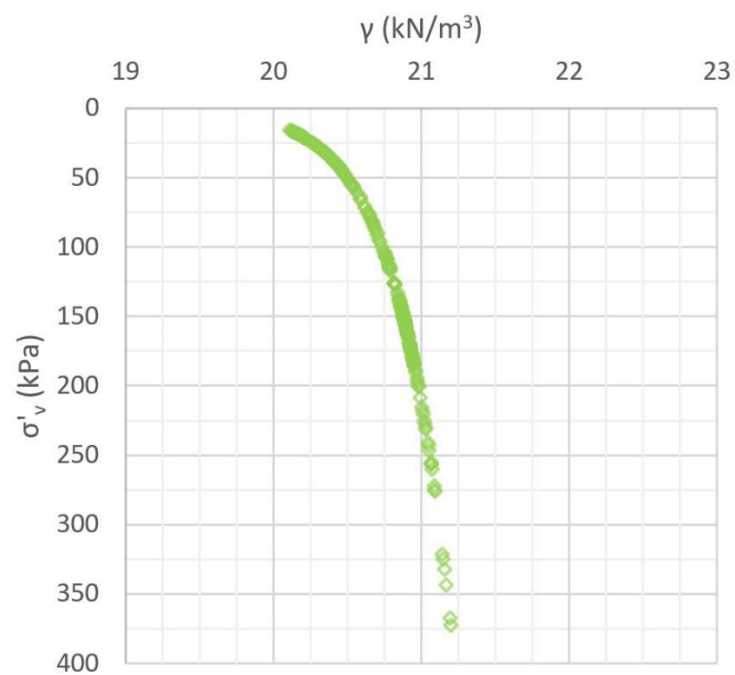
CPT13-02

Figure A8-3 : Poids volumique en fonction des contraintes effectives *in situ* du CPT13-02

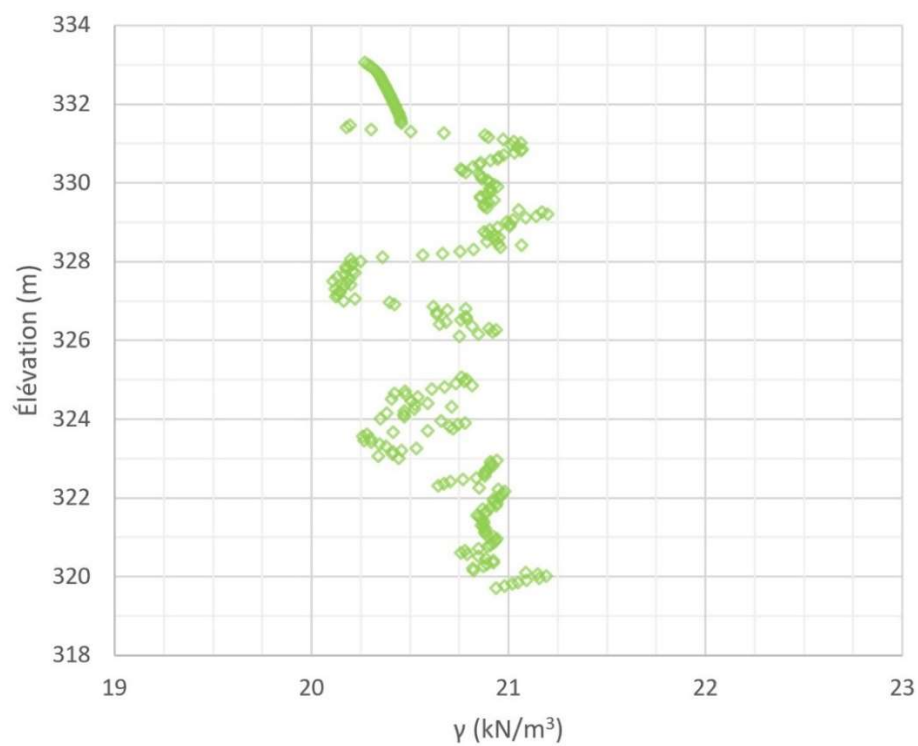


Figure A8-4 : Poids volumique en fonction de l'élévation du CPT13-02

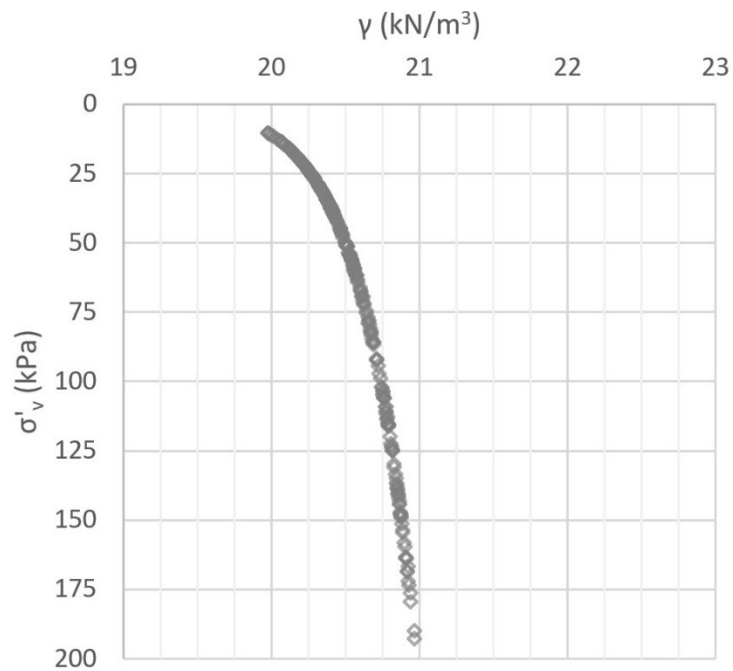
CPT13-03

Figure A8-5 : Poids volumique en fonction des contraintes effectives *in situ* du CPT13-03

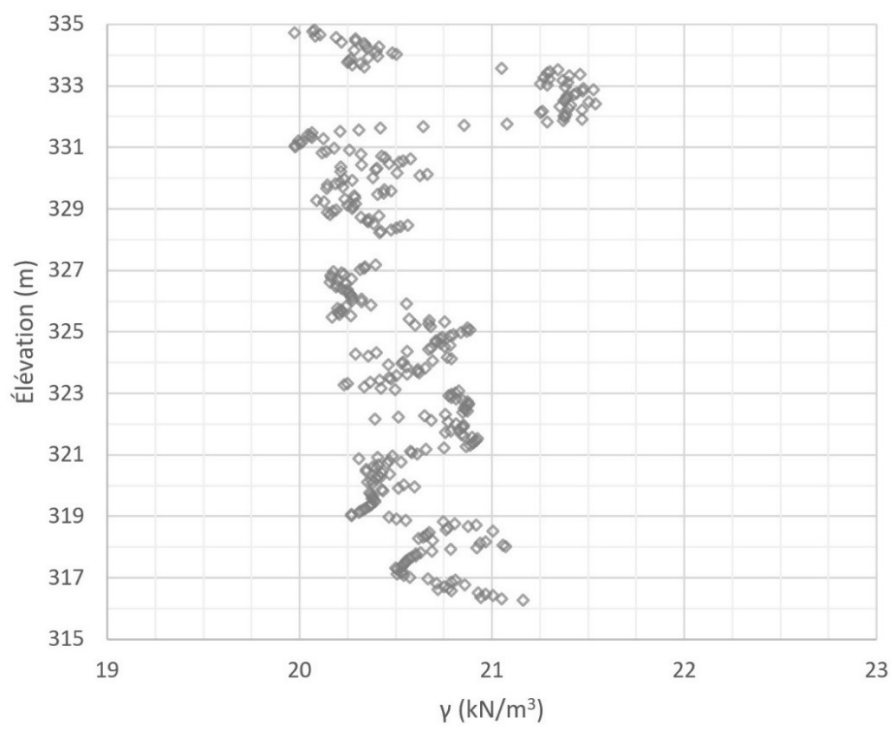


Figure A8-6 : Poids volumique en fonction de l'élévation du CPT13-03

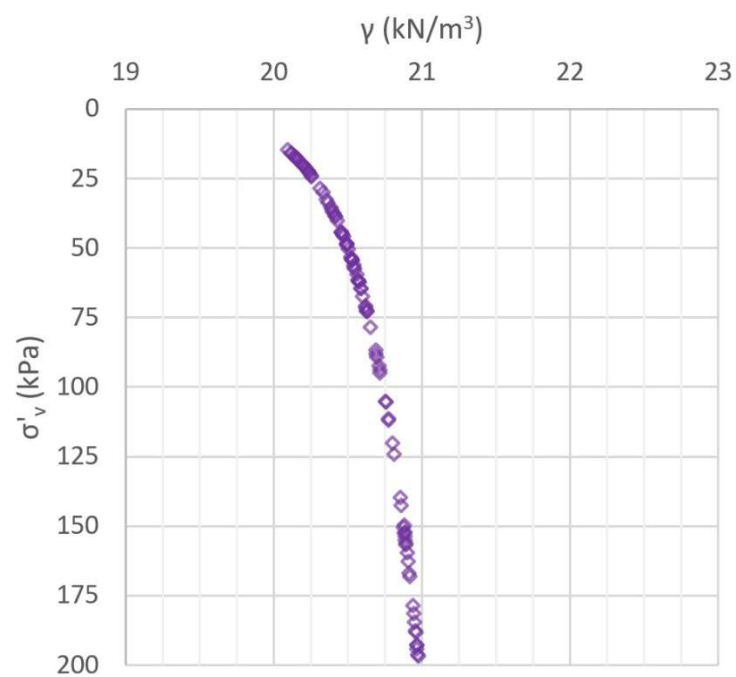
CPT13-04

Figure A8-7 : Poids volumique en fonction des contraintes effectives *in situ* du CPT13-04

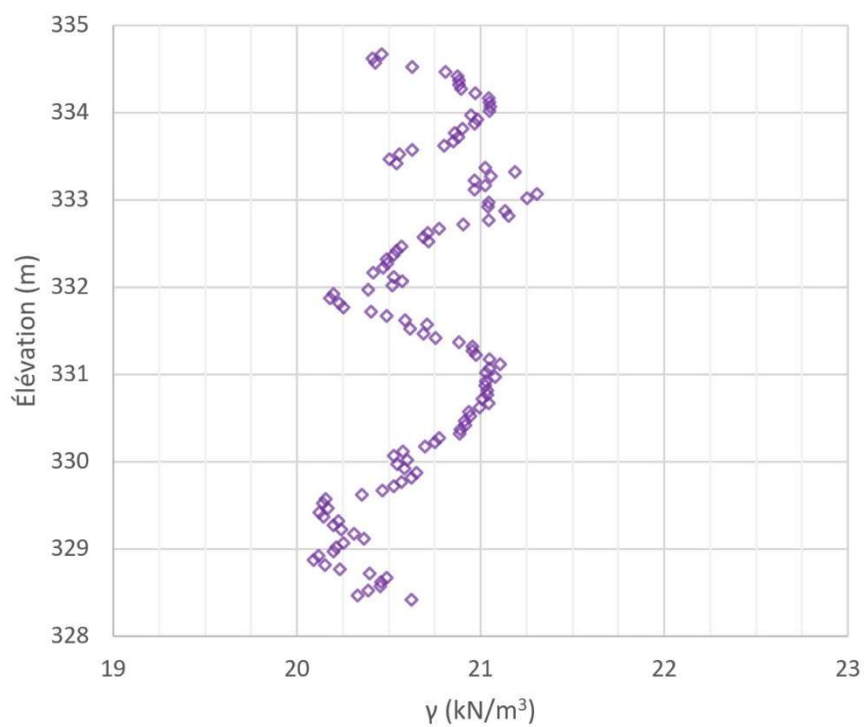


Figure A8-8 : Poids volumique en fonction de l'élévation du CPT13-04

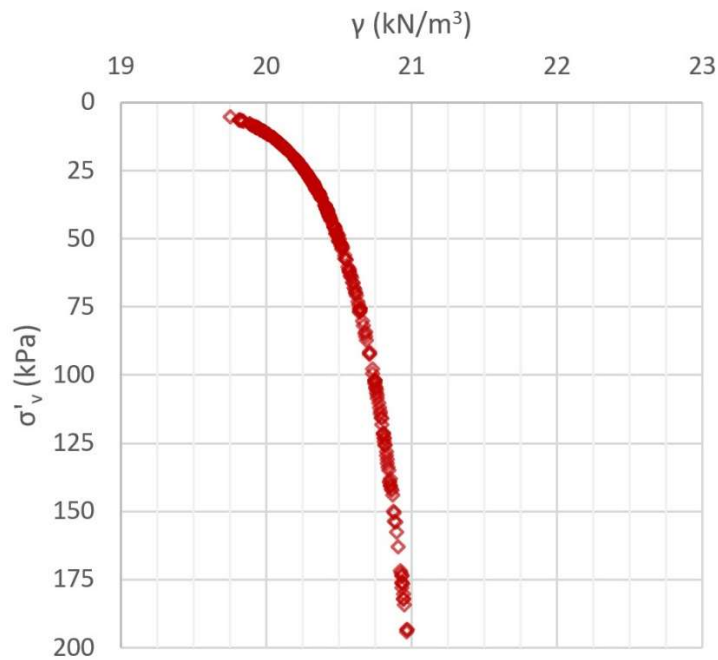
CPT13-05

Figure A8-9 : Poids volumique en fonction des contraintes effectives *in situ* du CPT13-05

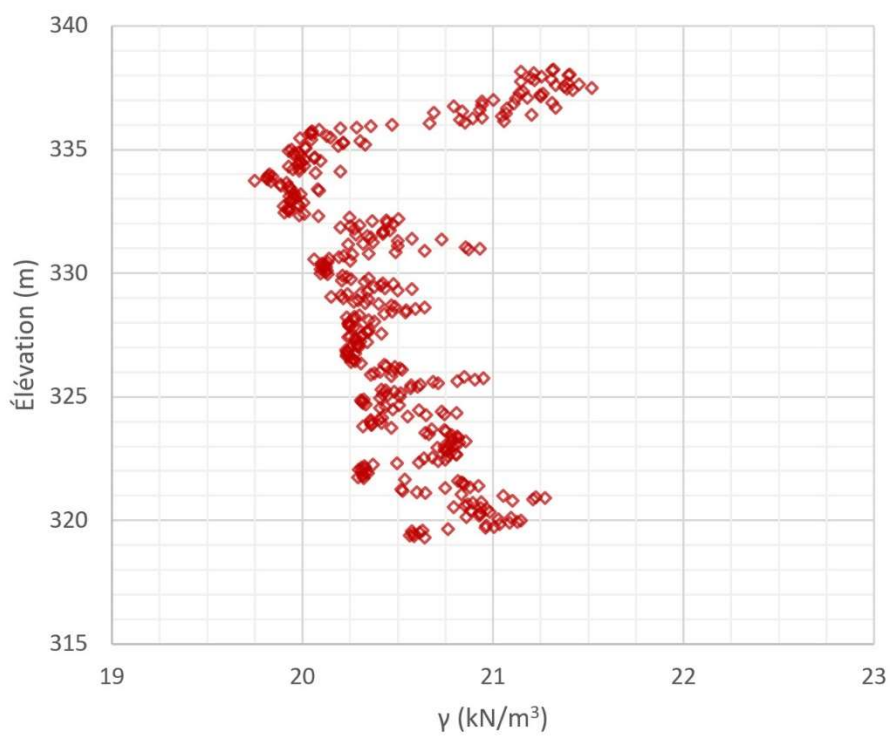


Figure A8-10 : Poids volumique en fonction de l'élévation du CPT13-05

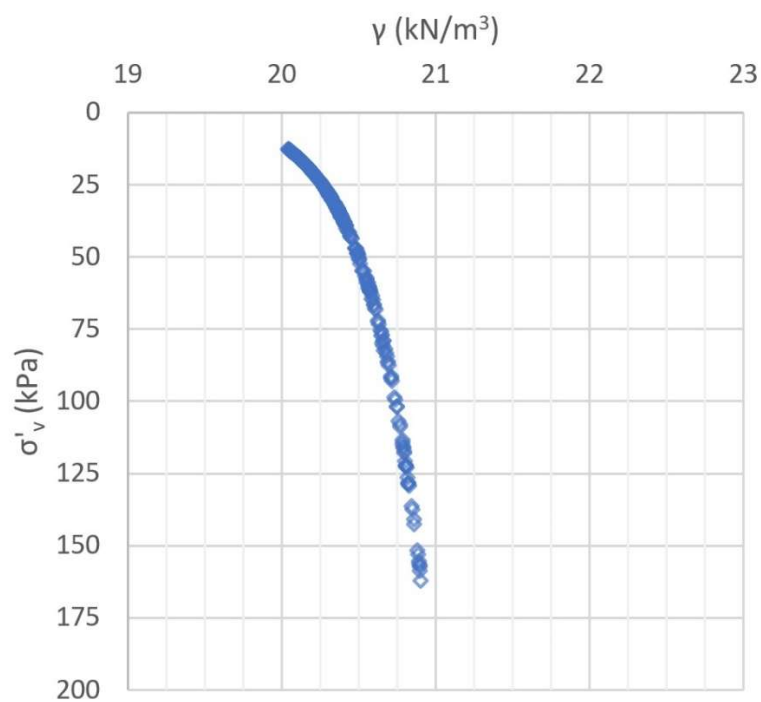
CPT13-06

Figure A8-11 : Poids volumique en fonction des contraintes effectives *in situ* du CPT13-06

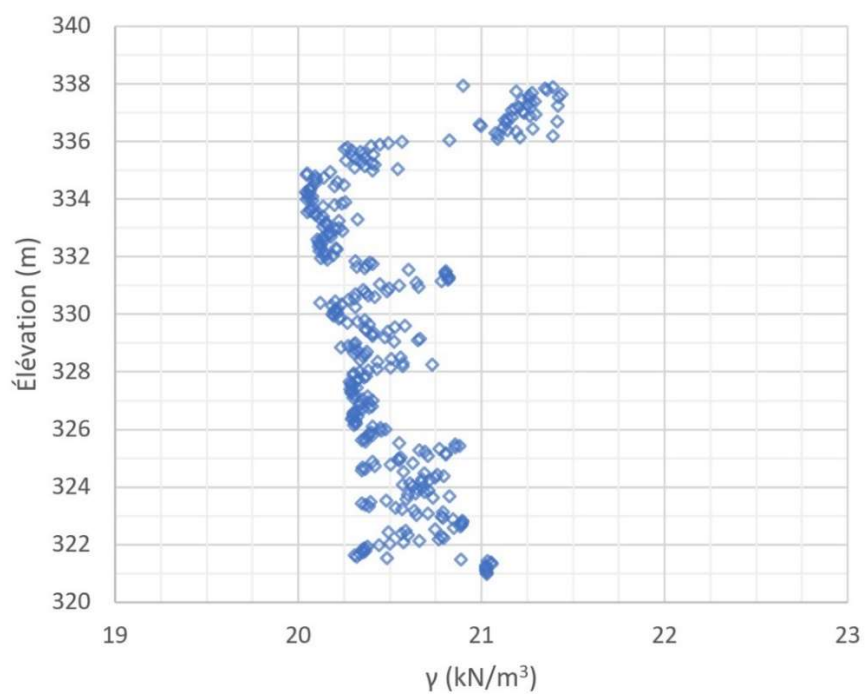


Figure A8-12 : Poids volumique en fonction de l'élévation du CPT13-06

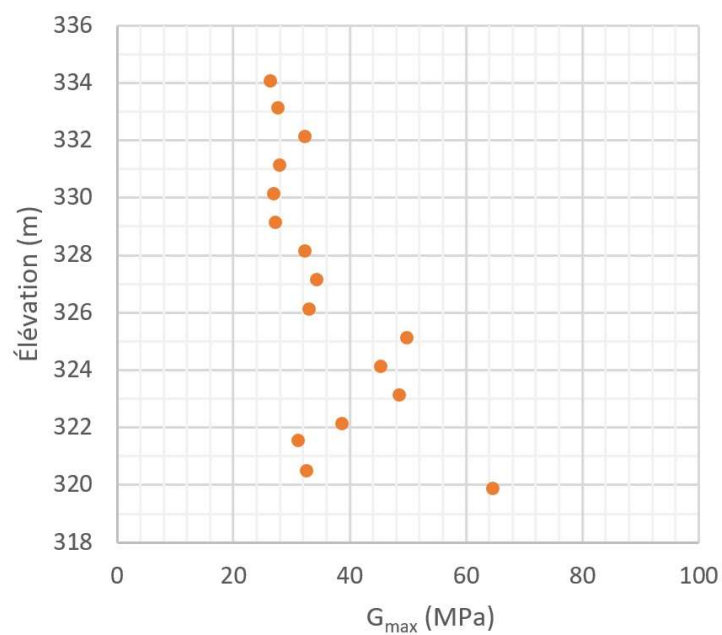
Module de cisaillement maximal**CPT13-01**

Figure A8-13 : Module de cisaillement maximal obtenu avec la corrélation calibrée du CPT13-01

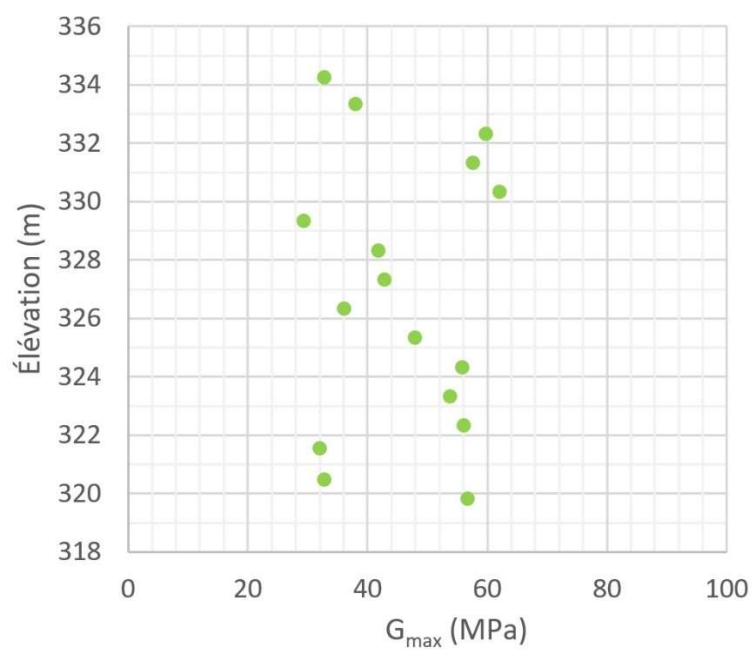
CPT13-02

Figure A8-14 : Module de cisaillement maximal obtenu avec la corrélation calibrée du CPT13-02

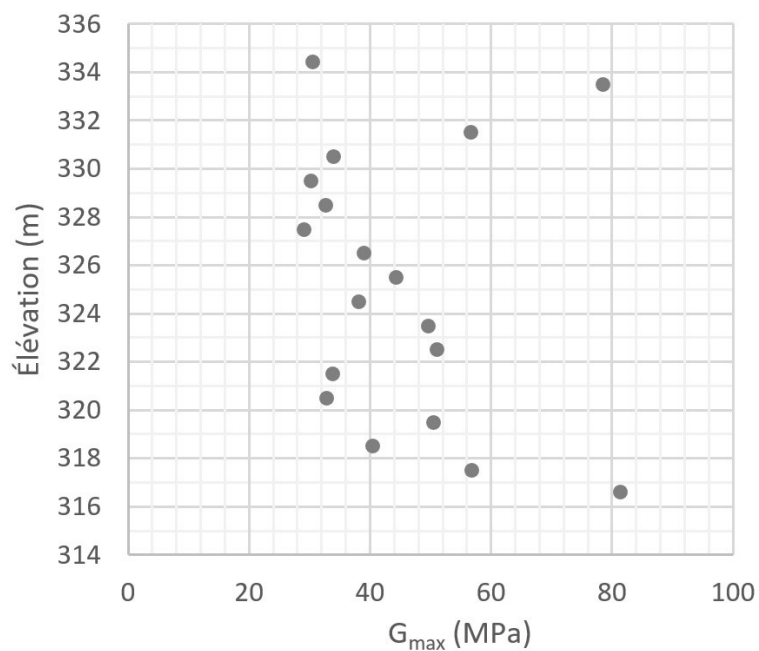
CPT13-03

Figure A8-15 : Module de cisaillement maximal obtenu avec la corrélation calibrée du CPT13-03

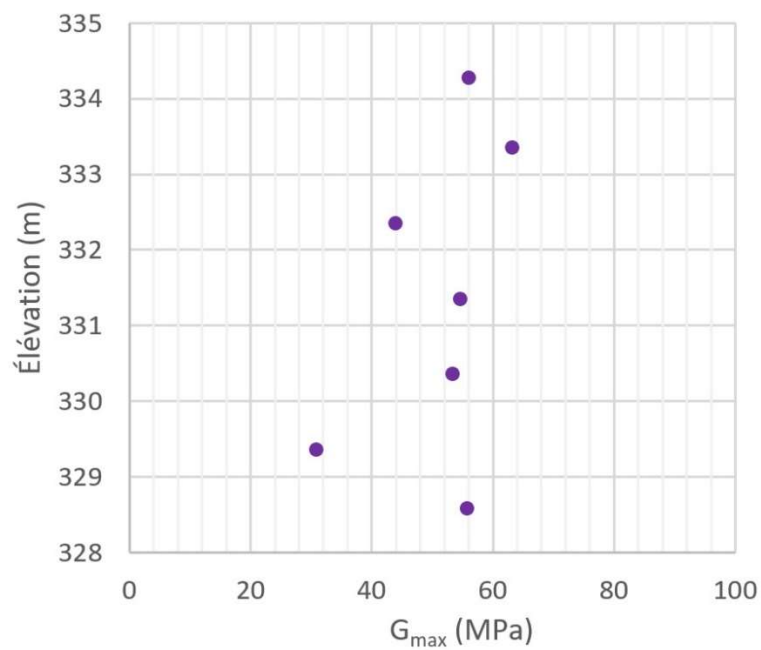
CPT13-04

Figure A8-16 : Module de cisaillement maximal obtenu avec la corrélation calibrée du CPT13-04

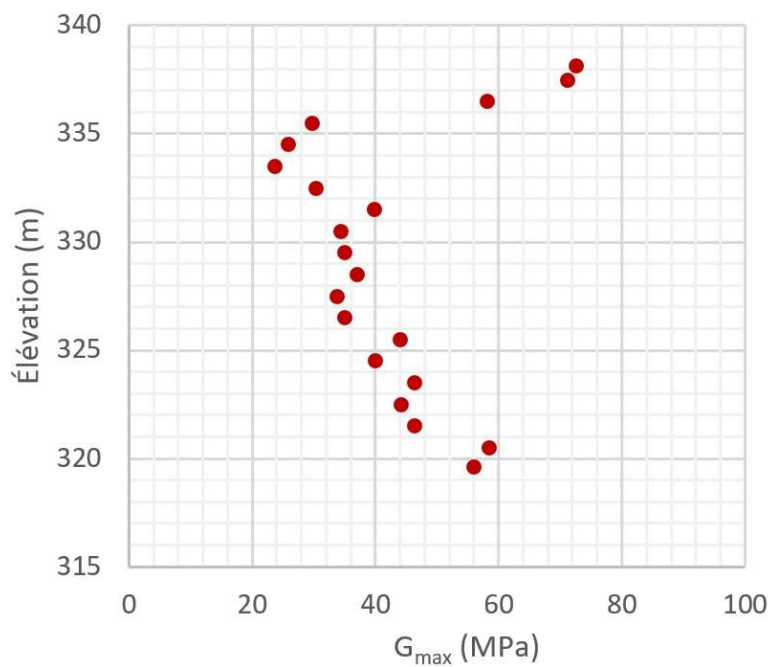
CPT13-05

Figure A8-17 : Module de cisaillement maximal obtenu avec la corrélation calibrée du CPT13-05

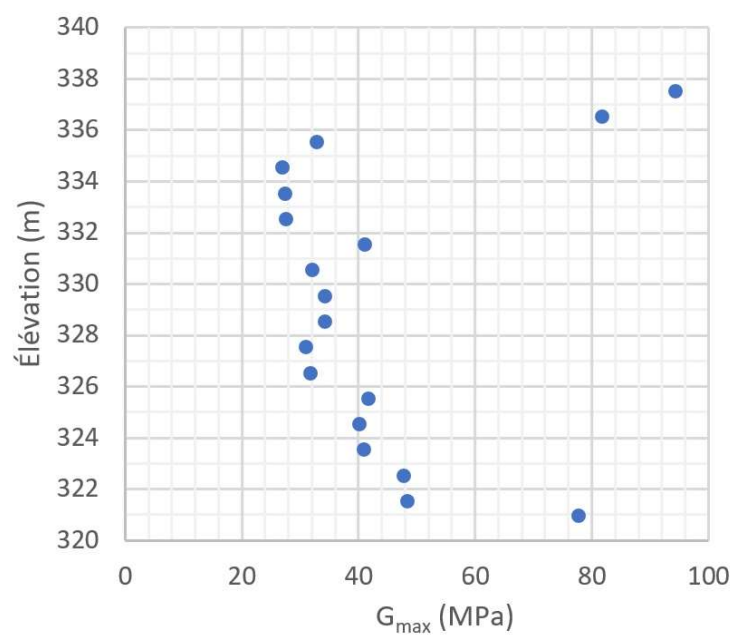
CPT13-06

Figure A8-18 : Module de cisaillement maximal obtenu avec la corrélation calibrée du CPT13-06

Vitesse des ondes de cisaillement

CPT13-01

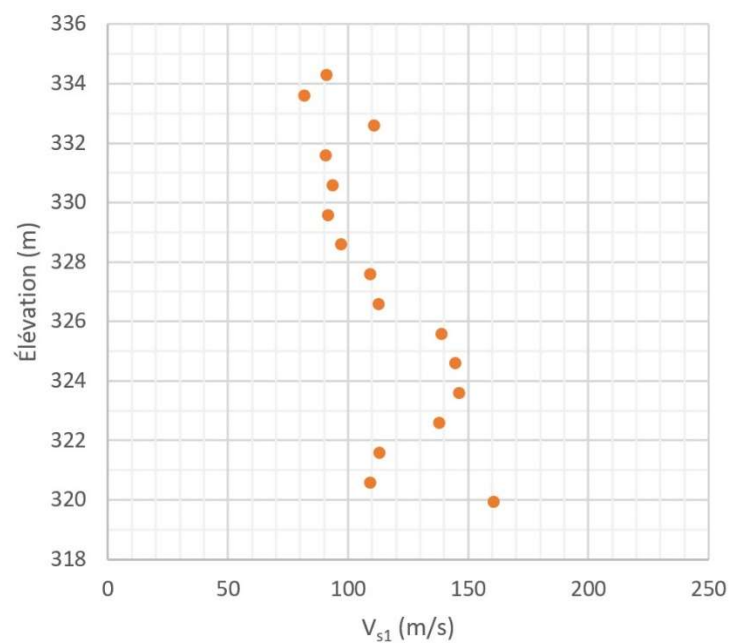


Figure A8-19 : V_{s1} obtenues avec la corrélation calibrée du CPT13-01

CPT13-02

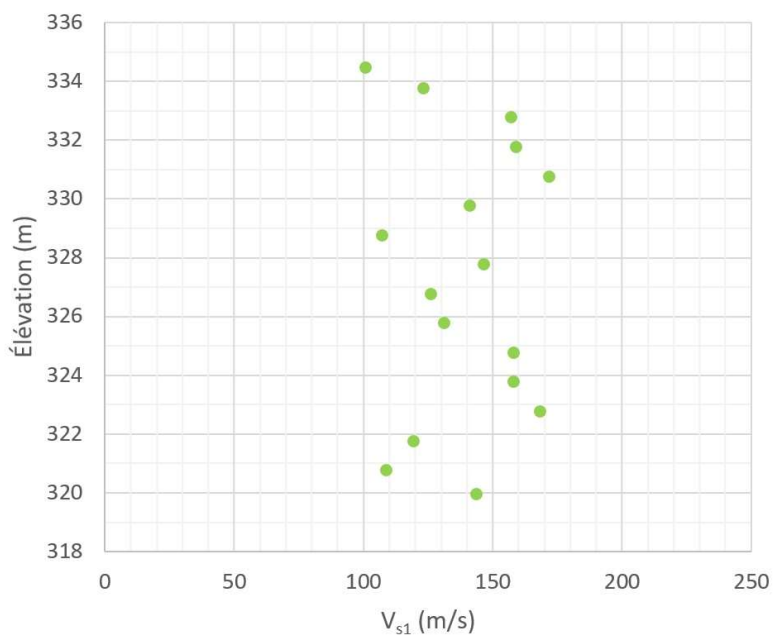


Figure A8-20 : V_{s1} obtenues avec la corrélation calibrée du CPT13-02

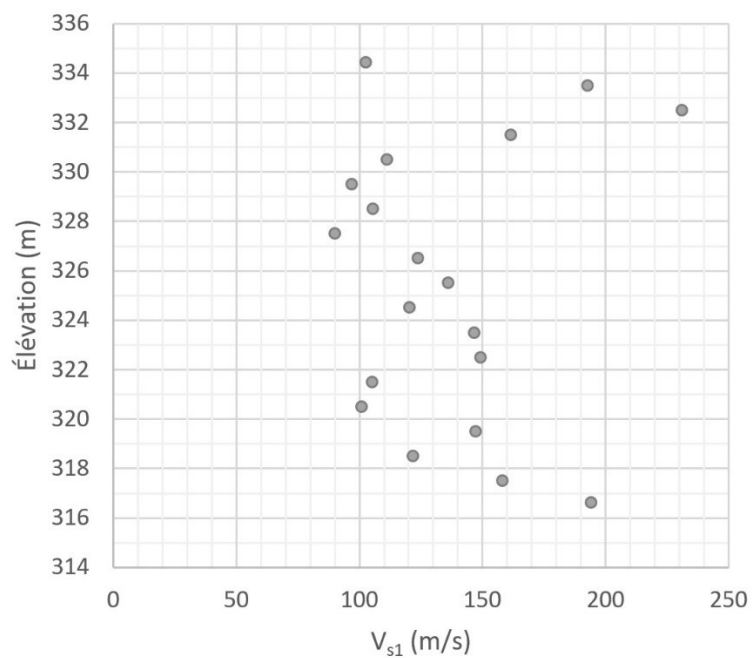
CPT13-03

Figure A8-21 : V_{s1} obtenues avec la corrélation calibrée du CPT13-03

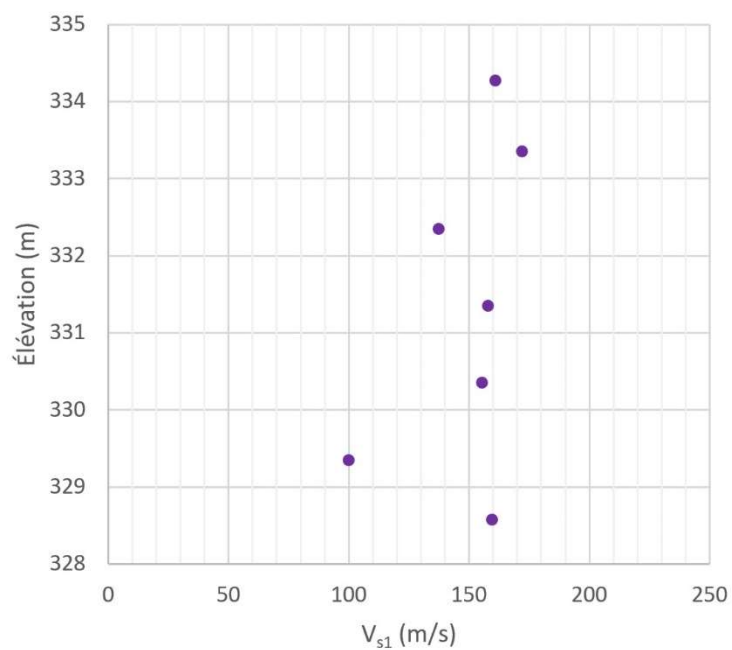
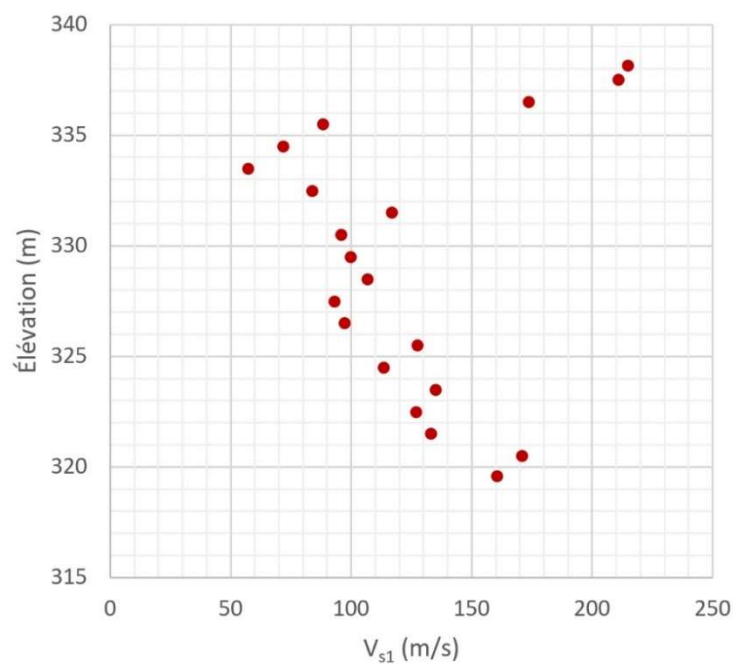
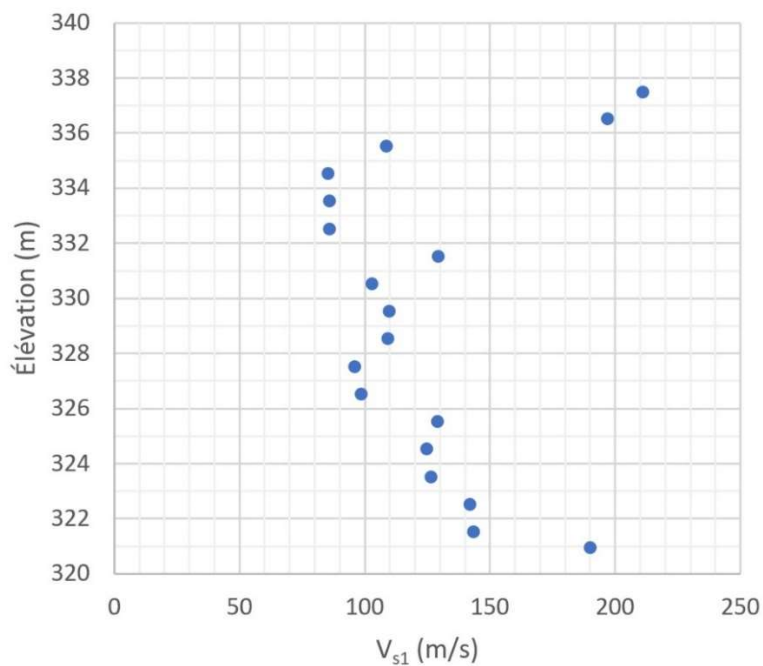
CPT13-04

Figure A8-22 : V_{s1} obtenues avec la corrélation calibrée du CPT13-04

CPT13-05Figure A8-23 : V_{s1} obtenues avec la corrélation calibrée du CPT13-05**CPT13-06**Figure A8-24 : V_{s1} obtenues avec la corrélation calibrée du CPT13-06

Indice de consolidation

CPT13-01

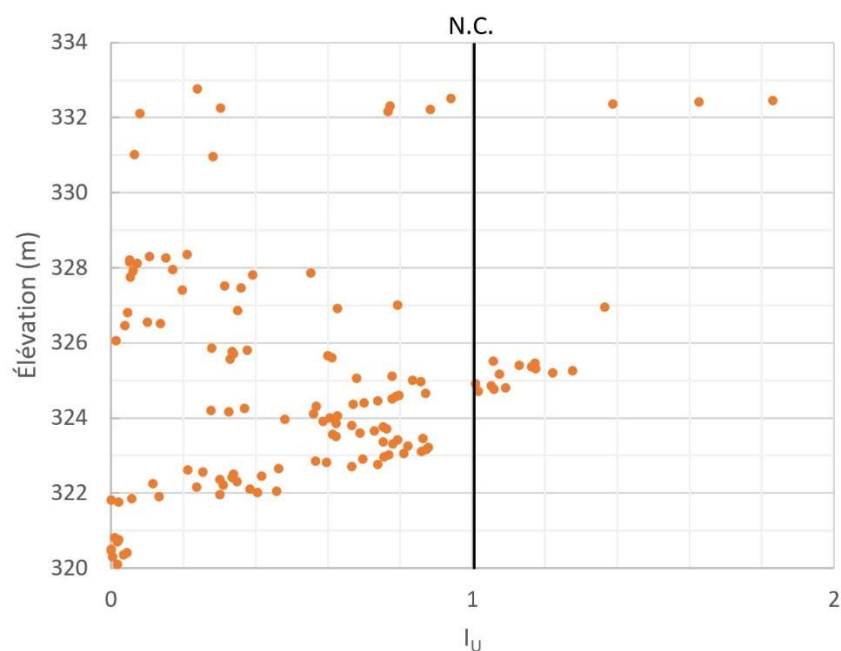


Figure A8-25 : Indice de consolidation en fonction de l'élévation du CPT13-01

CPT13-02

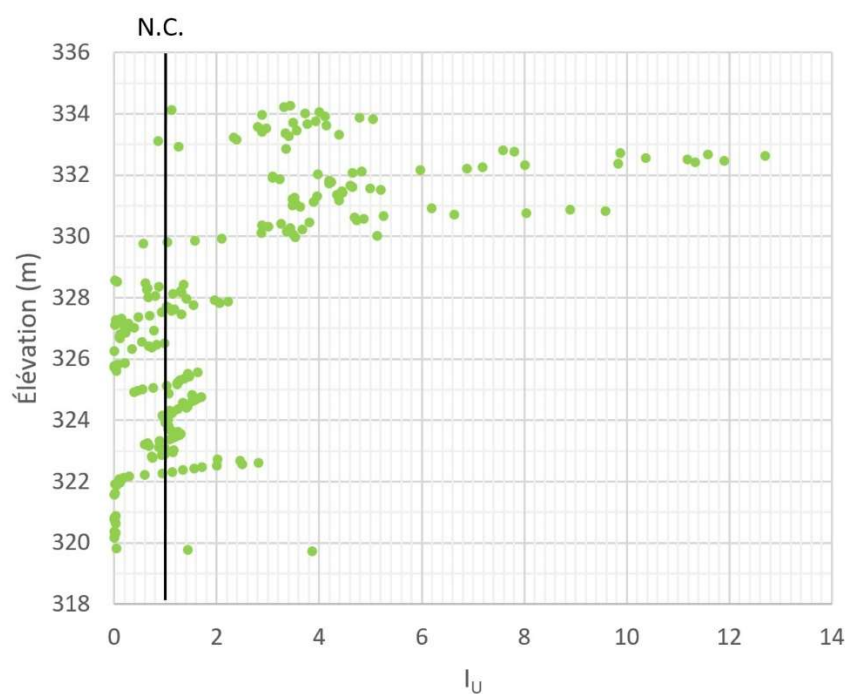


Figure A8-26 : Indice de consolidation en fonction de l'élévation du CPT13-02

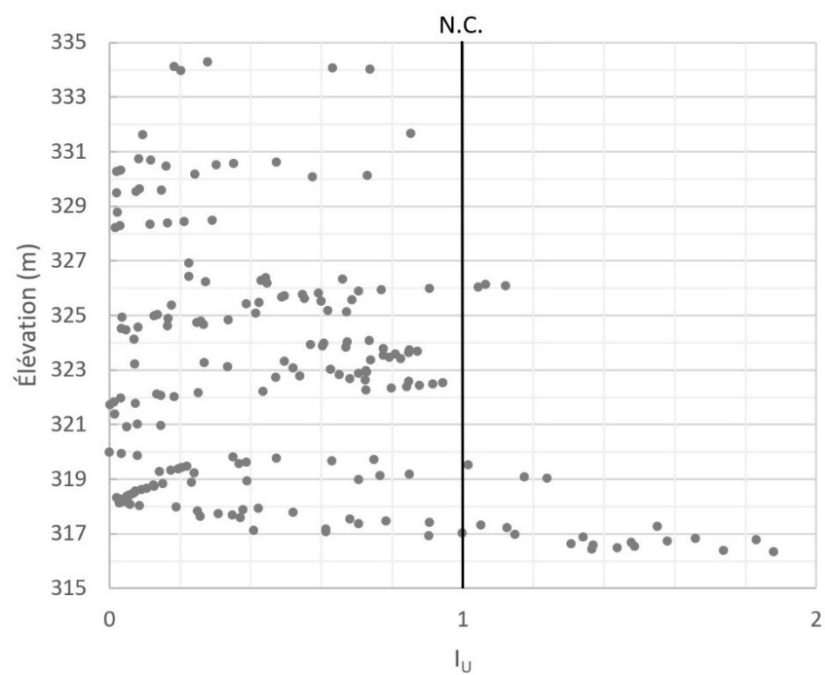
CPT13-03

Figure A8-27 : Indice de consolidation en fonction de l'élévation du CPT13-03

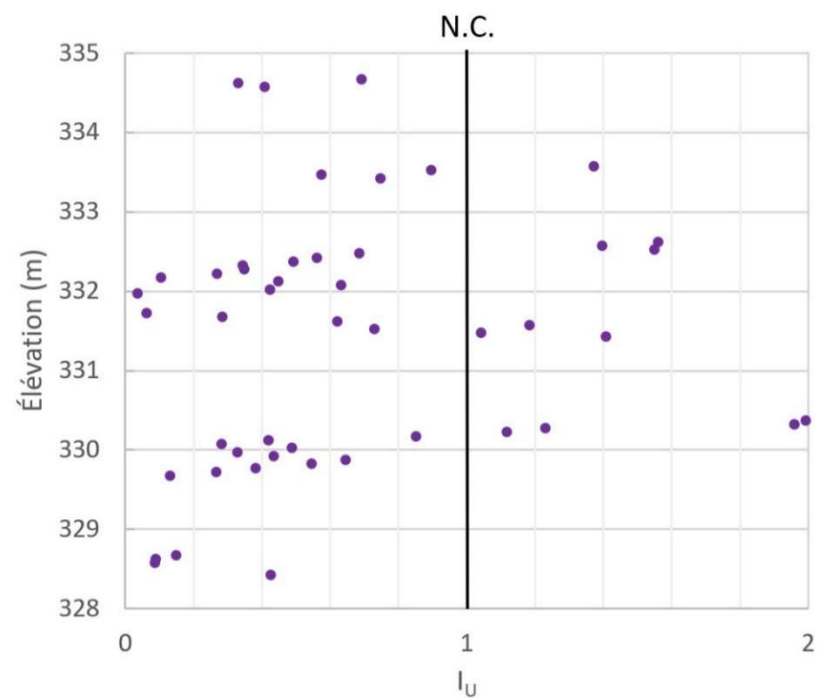
CPT13-04

Figure A8-28 : Indice de consolidation en fonction de l'élévation du CPT13-04

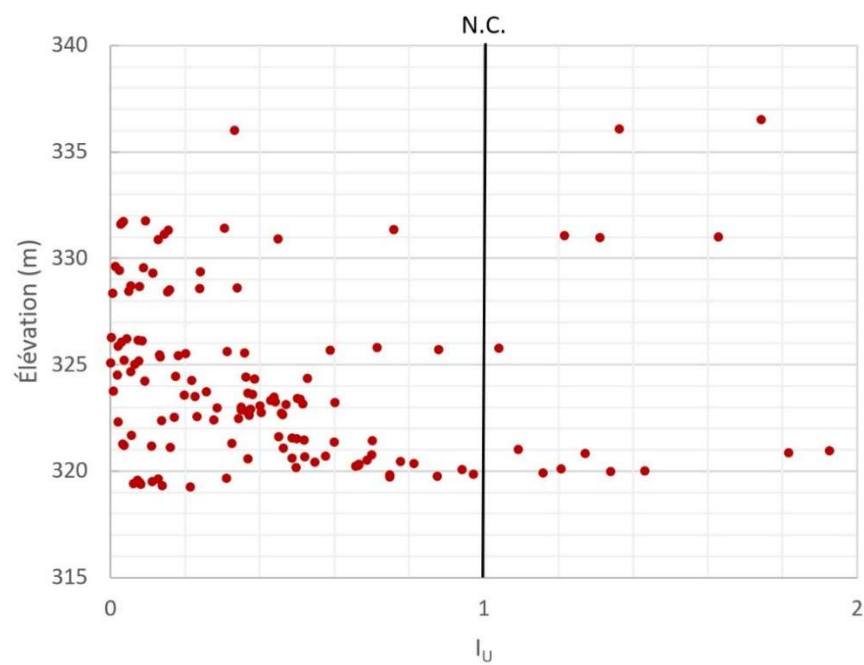
CPT13-05

Figure A8-29 : Indice de consolidation en fonction de l'élévation du CPT13-05

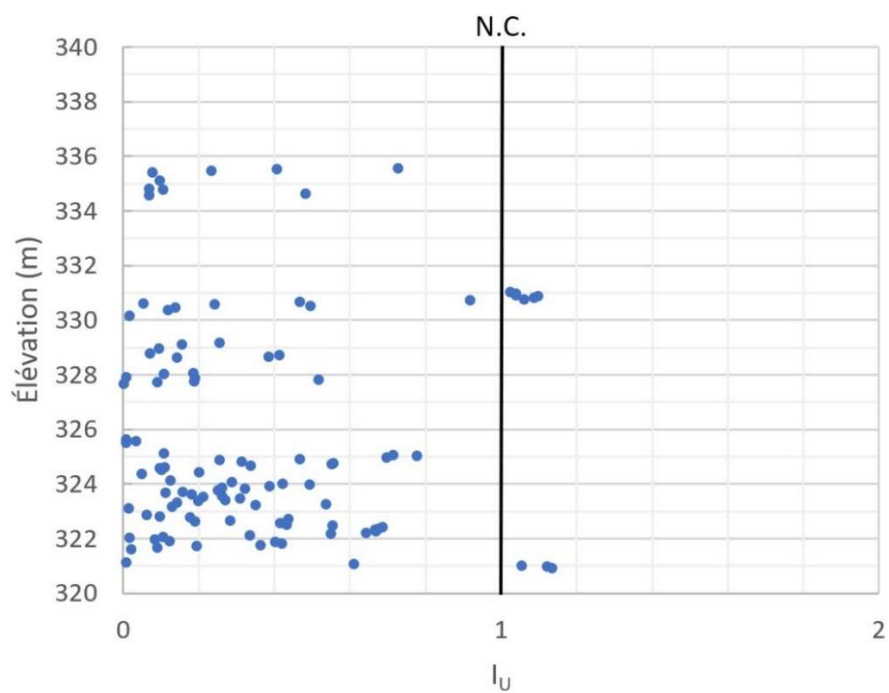
CPT13-06

Figure A8-30 : Indice de consolidation en fonction de l'élévation du CPT13-06

ANNEXE 9 – PARAMÈTRES DE CARACTÉRISATION DES CPT_u ET SCPT_u DE 2016

Poids volumique

SCPT16-66

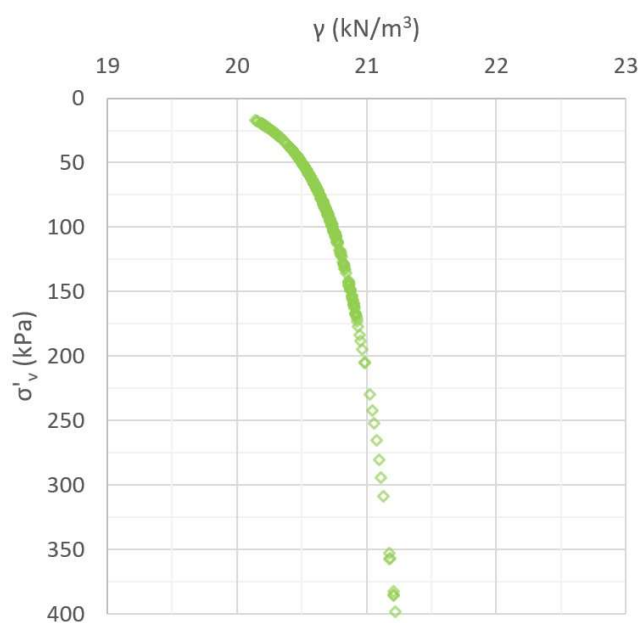


Figure A9-1 : Poids volumique en fonction des contraintes effectives *in situ* du SCPT16-66

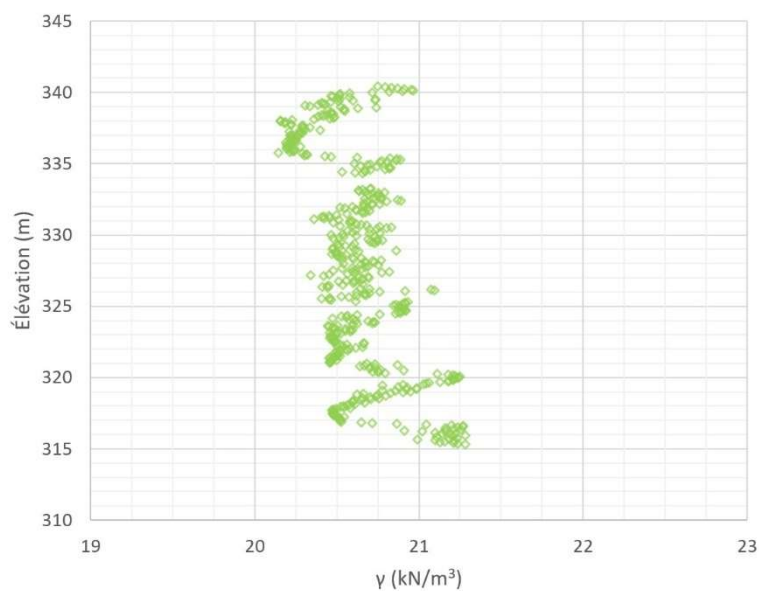


Figure A9-2 : Poids volumique en fonction de l'élévation du SCPT16-66

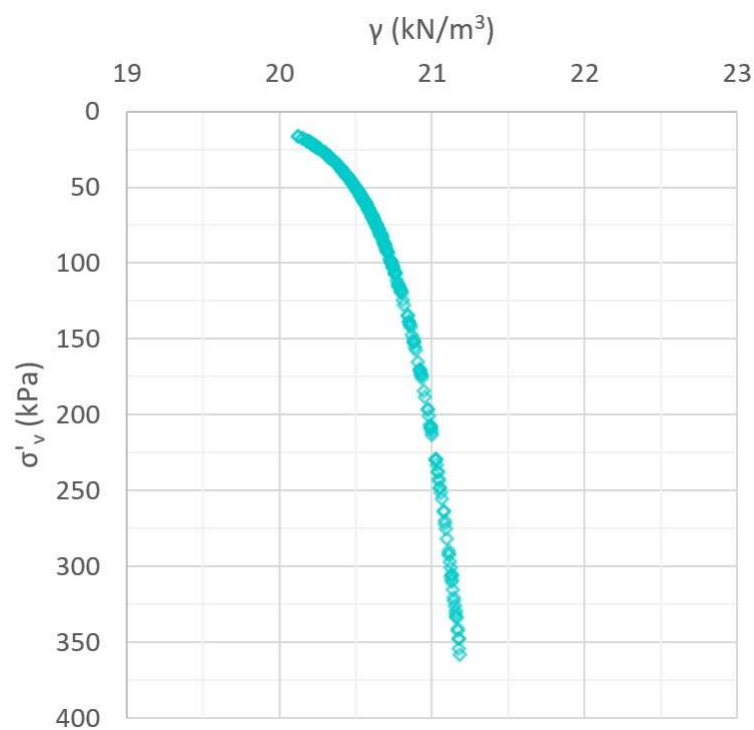
SCPT16-67

Figure A9-3 : Poids volumique en fonction des contraintes effectives *in situ* du SCPT16-67

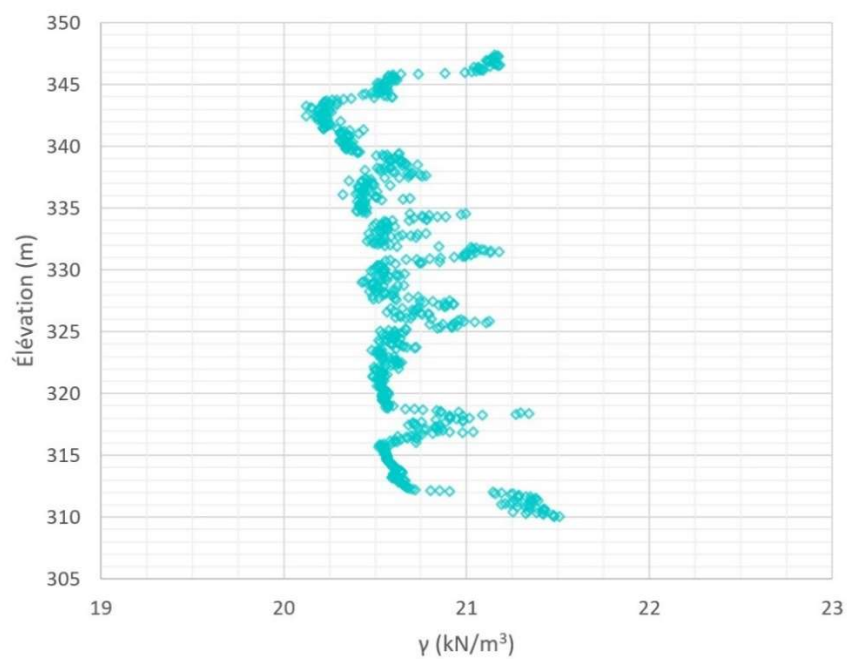


Figure A9-4 : Poids volumique en fonction de l'élévation du SCPT16-67

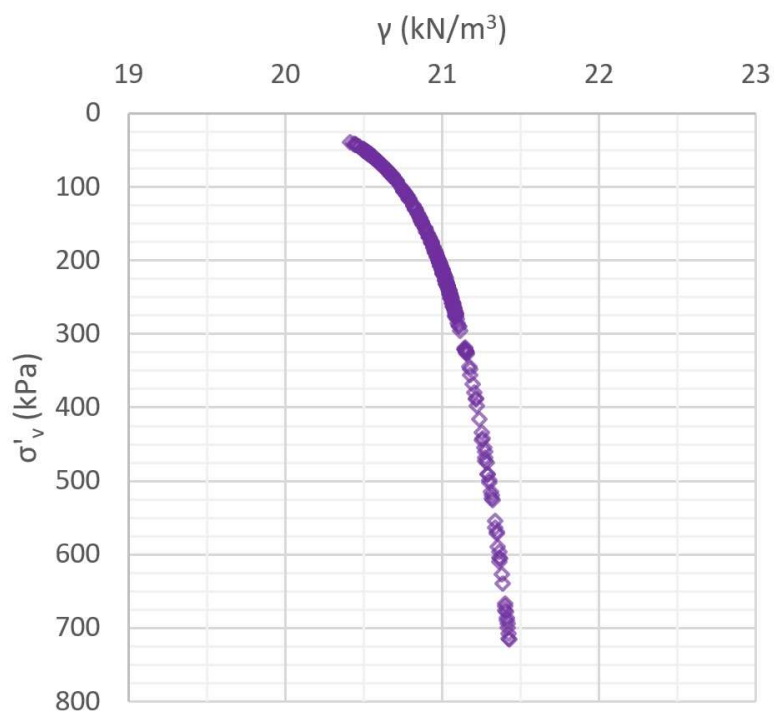
SCPT16-68

Figure A9-5 : Poids volumique en fonction des contraintes effectives *in situ* du SCPT16-68

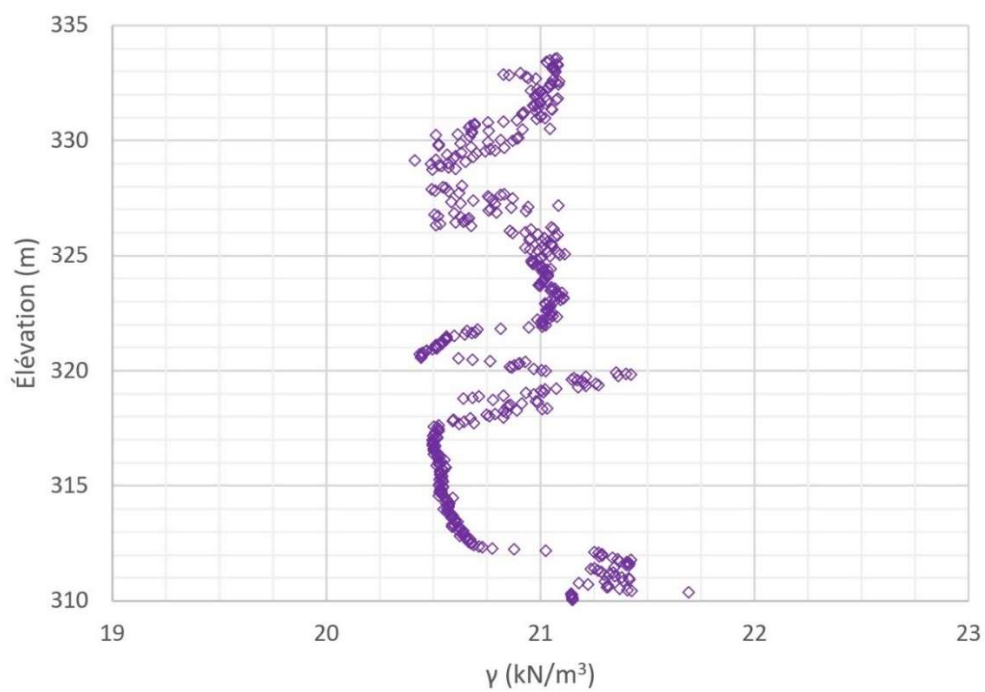


Figure A9-6 : Poids volumique en fonction de l'élévation du SCPT16-68

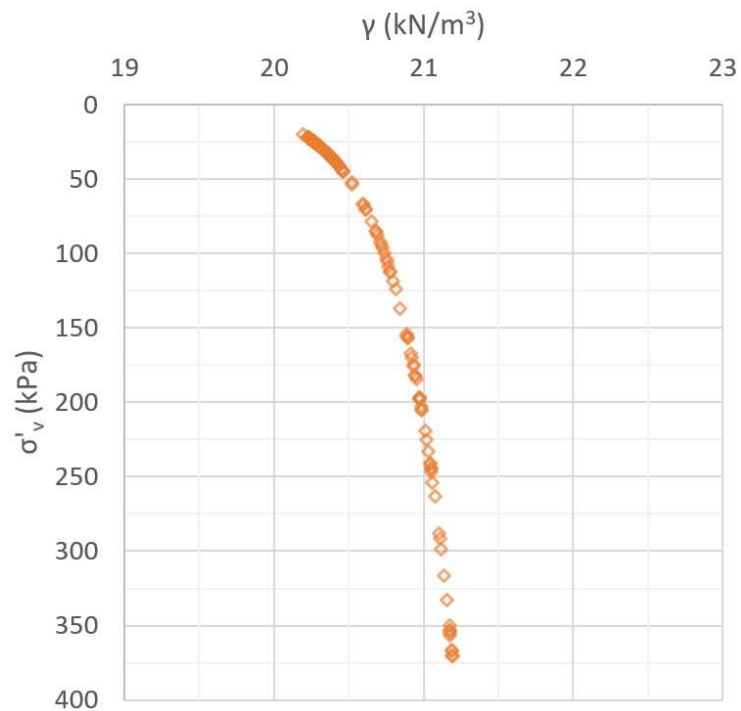
SCPT16-69

Figure A9-7 : Poids volumique en fonction des contraintes effectives *in situ* du SCPT16-69

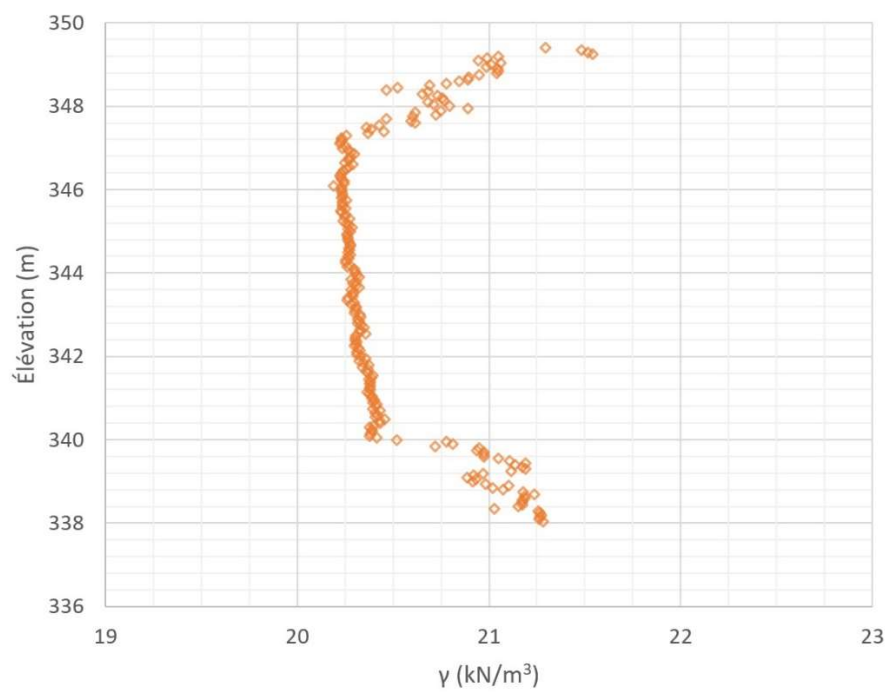


Figure A9-8 : Poids volumique en fonction de l'élévation du SCPT16-69

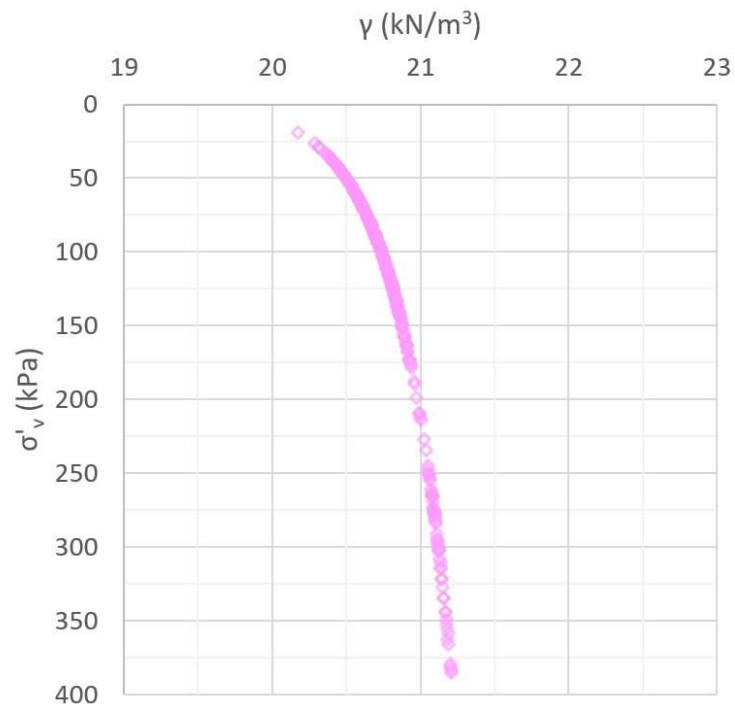
SCPT16-70

Figure A9-9 : Poids volumique en fonction des contraintes effectives *in situ* du SCPT16-70

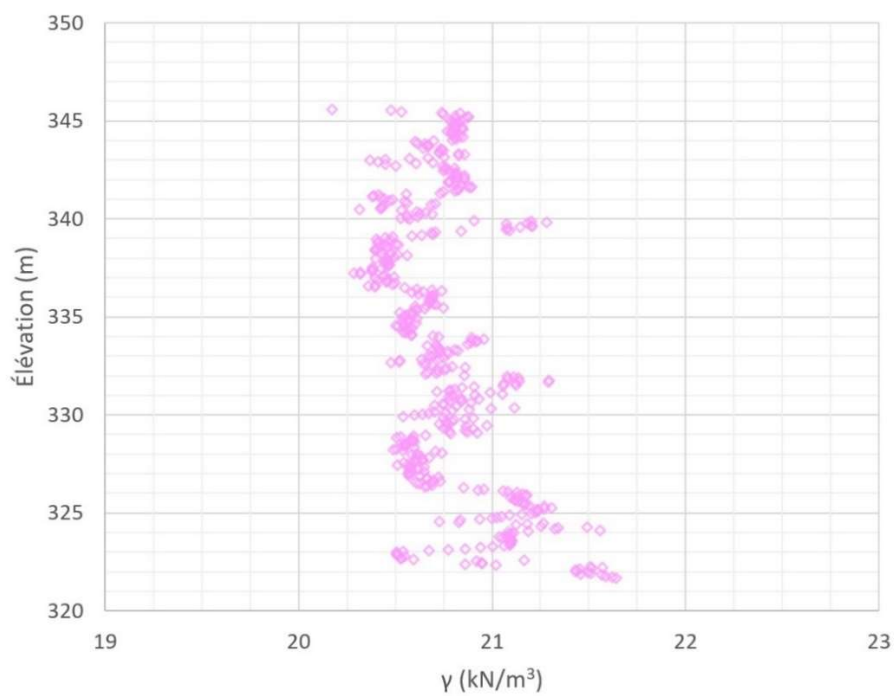


Figure A9-10 : Poids volumique en fonction de l'élévation du SCPT16-70

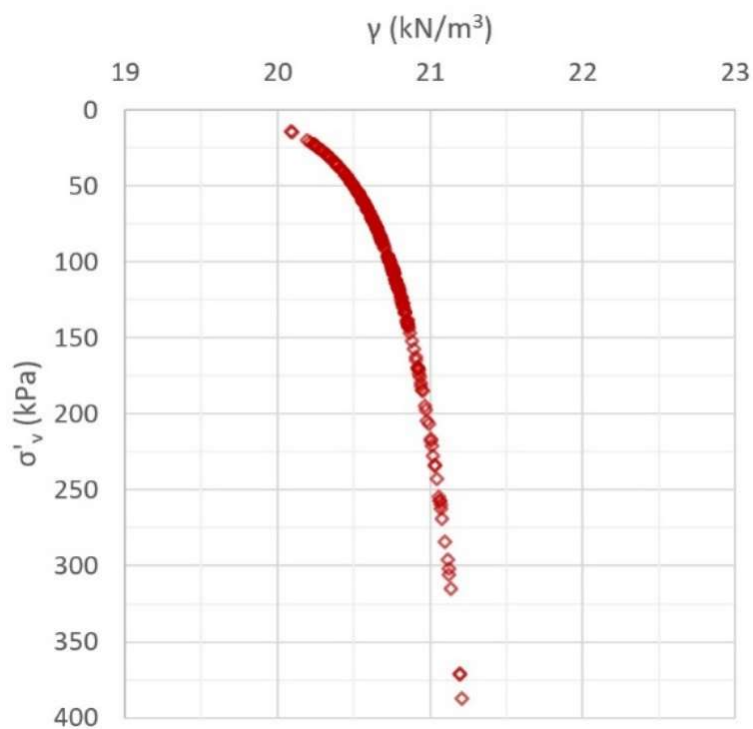
SCPT16-71

Figure A9-11 : Poids volumique en fonction des contraintes effectives *in situ* du SCPT16-71

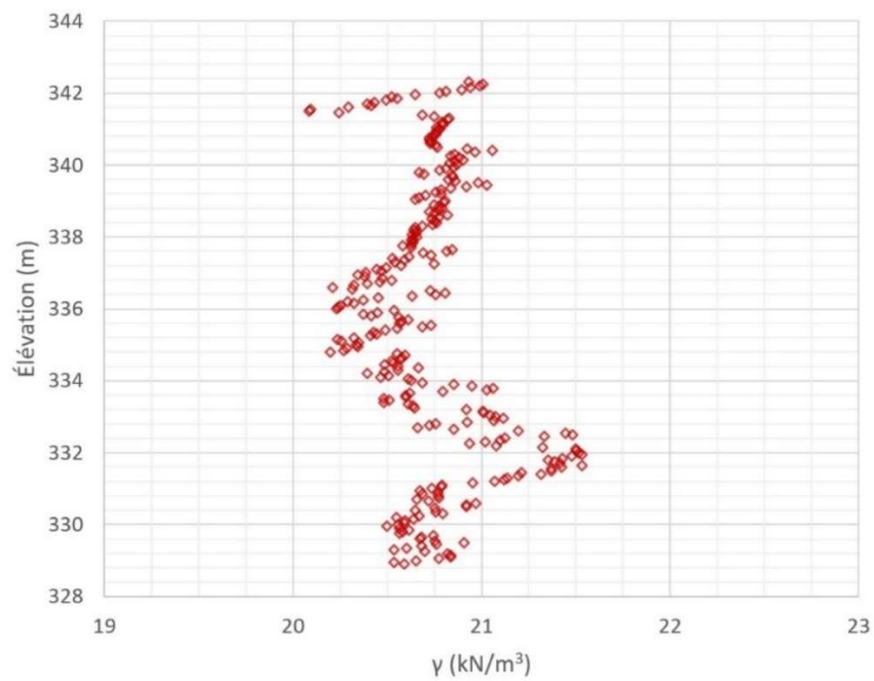


Figure A9-12 : Poids volumique en fonction de l'élévation du SCPT16-71

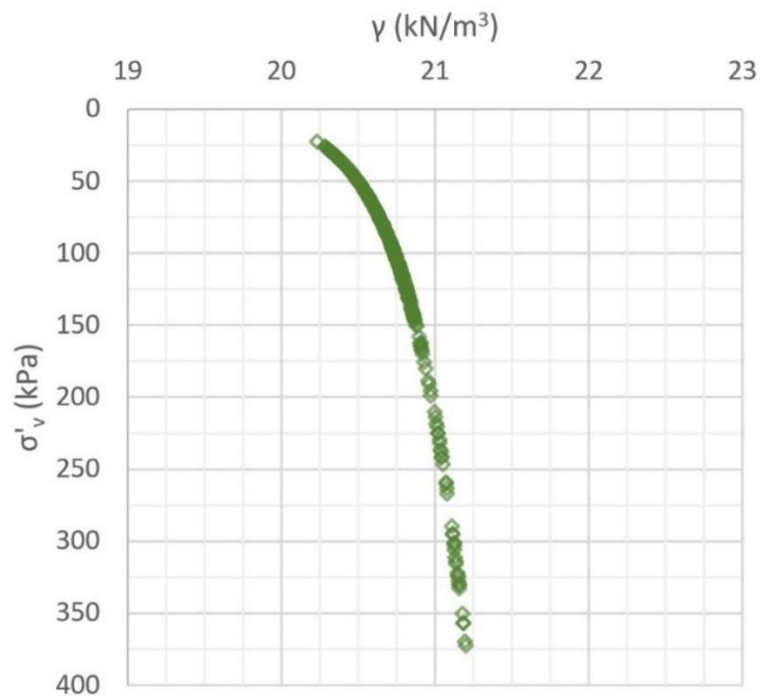
CPT16-72

Figure A9-13 : Poids volumique en fonction des contraintes effectives *in situ* du CPT16-72

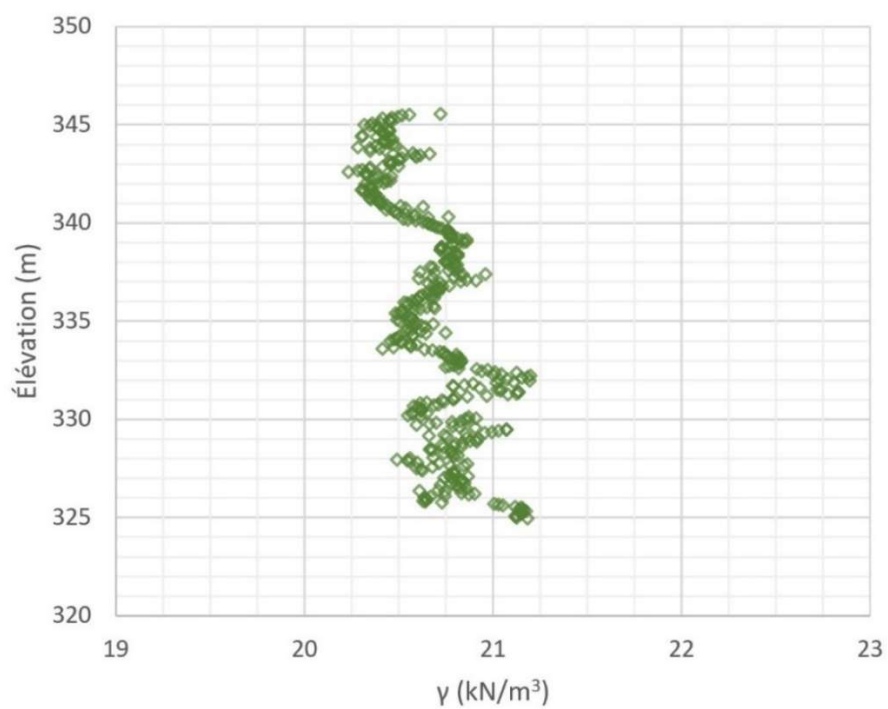


Figure A9-14 : Poids volumique en fonction de l'élévation du CPT16-72

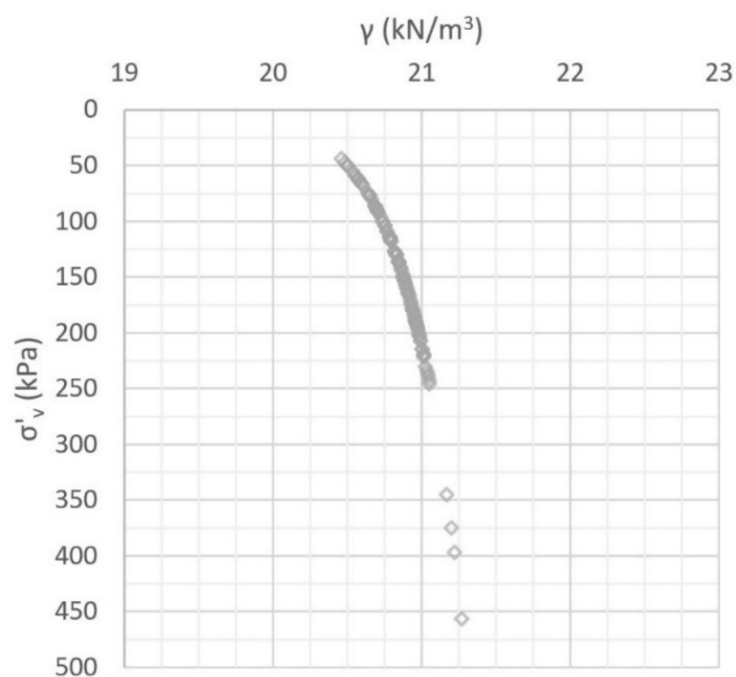
CPT16-73

Figure A9-15 : Poids volumique en fonction des contraintes effectives *in situ* du SCPT16-73

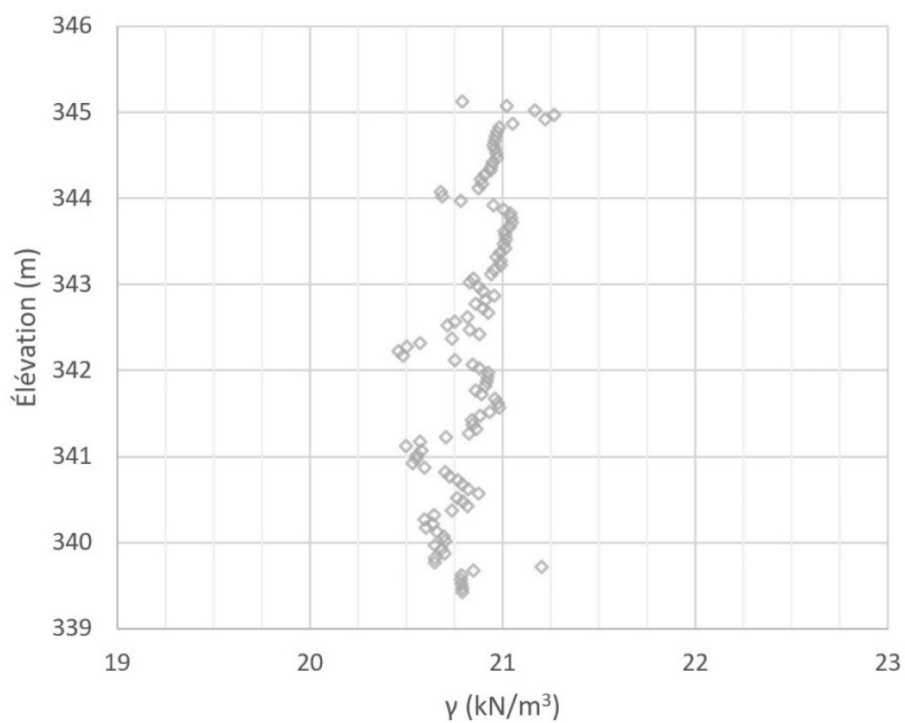


Figure A9-16 : Poids volumique en fonction de l'élévation du SCPT16-73

Module de cisaillement maximal

SCPT16-66

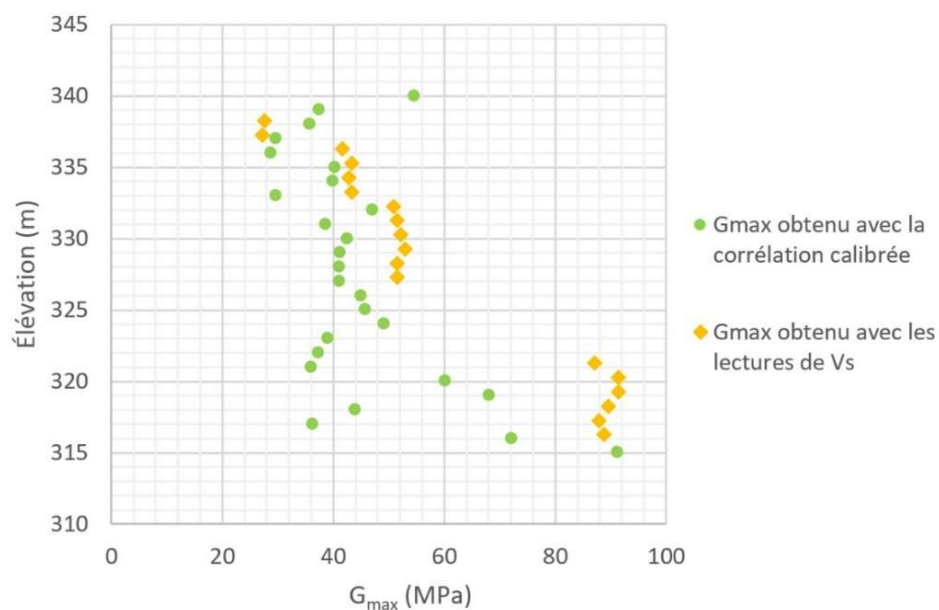


Figure A9-17 : Module de cisaillement maximal obtenu avec la corrélation calibrée du SCPT16-66

SCPT16-67

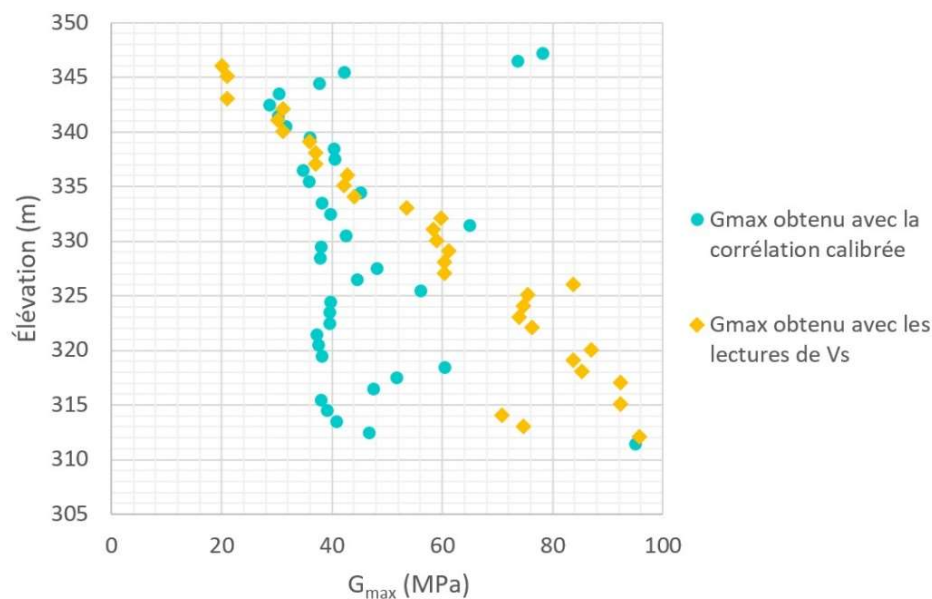


Figure A9-18 : Module de cisaillement maximal obtenu avec la corrélation calibrée du SCPT16-67

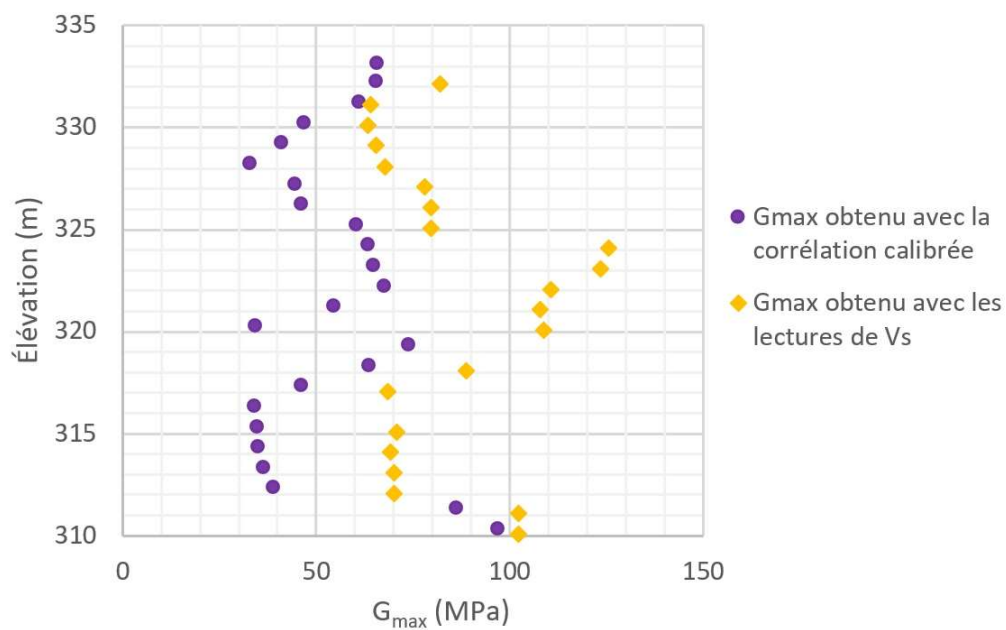
SCPT16-68

Figure A9-19 : Module de cisaillement maximal obtenu avec la corrélation calibrée du SCPT16-68

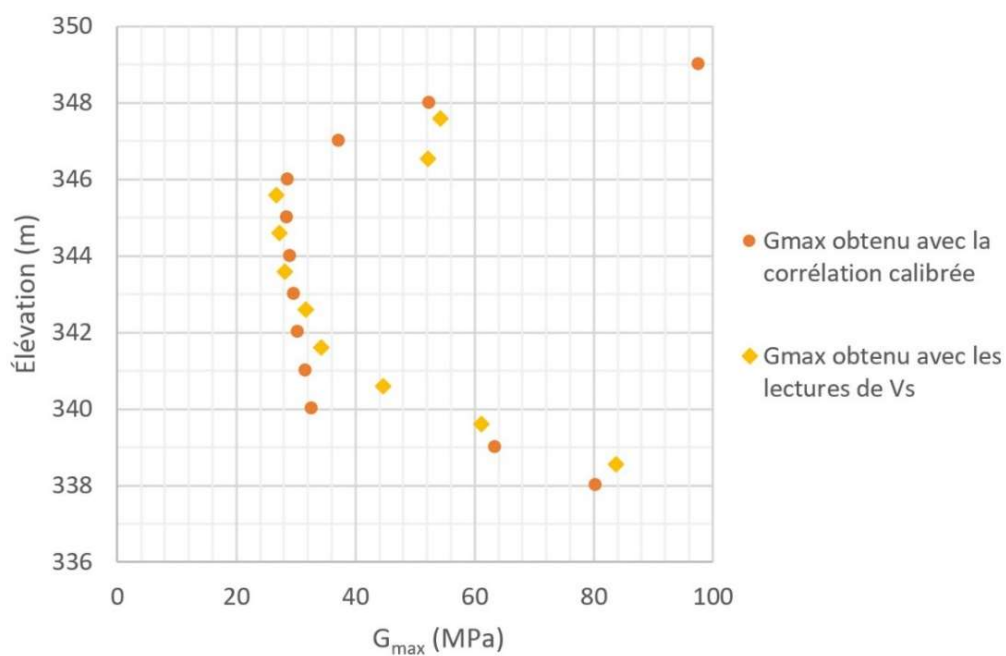
SCPT16-69

Figure A9-20 : Module de cisaillement maximal obtenu avec la corrélation calibrée du SCPT16-69

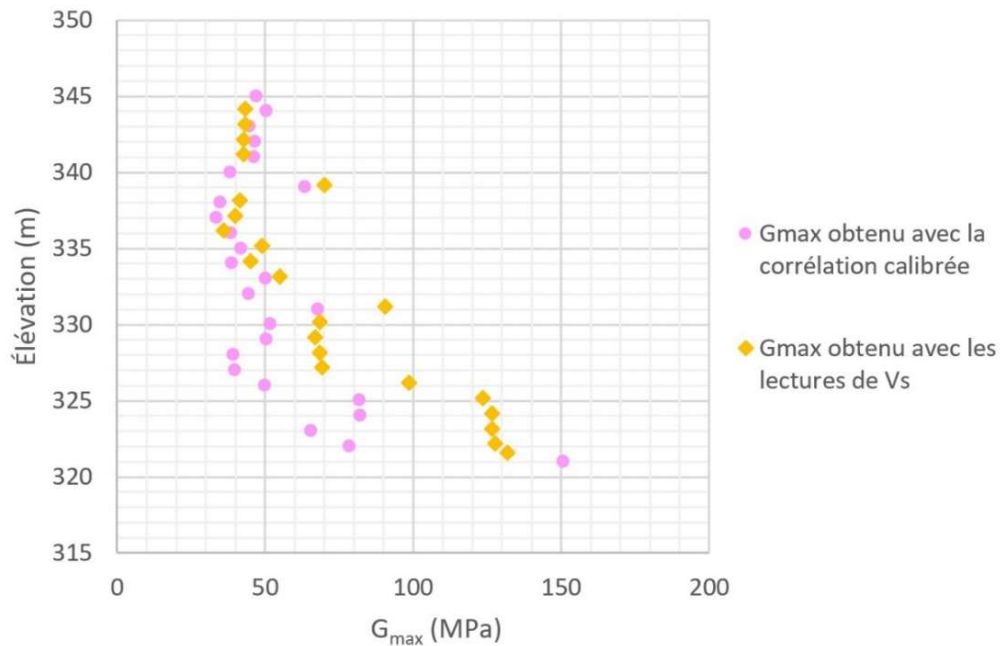
SCPT16-70

Figure A9-21 : Module de cisaillement maximal obtenu avec la corrélation calibrée du SCPT16-70

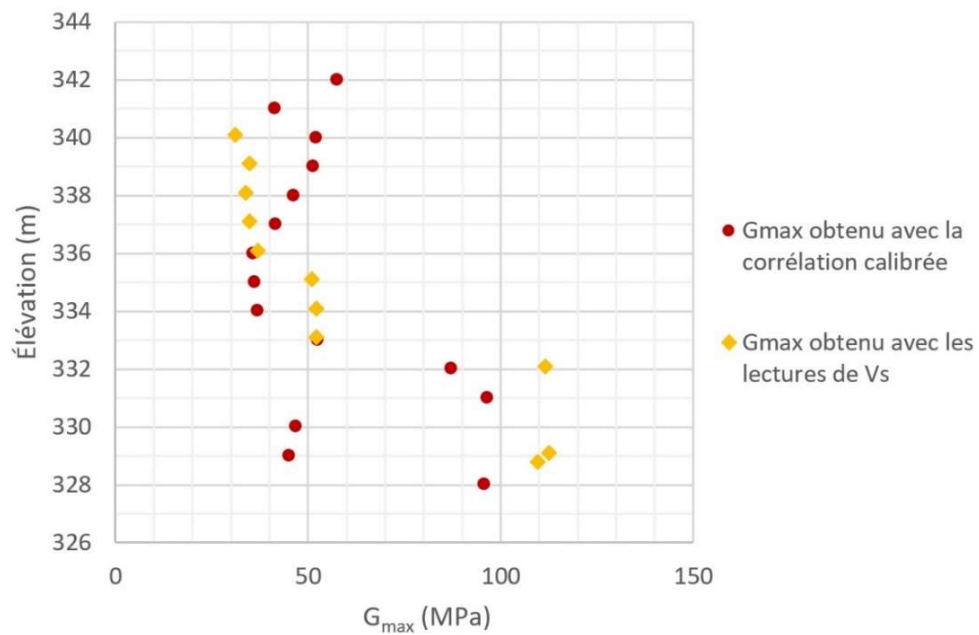
SCPT16-71

Figure A9-22 : Module de cisaillement maximal obtenu avec la corrélation calibrée du SCPT16-71

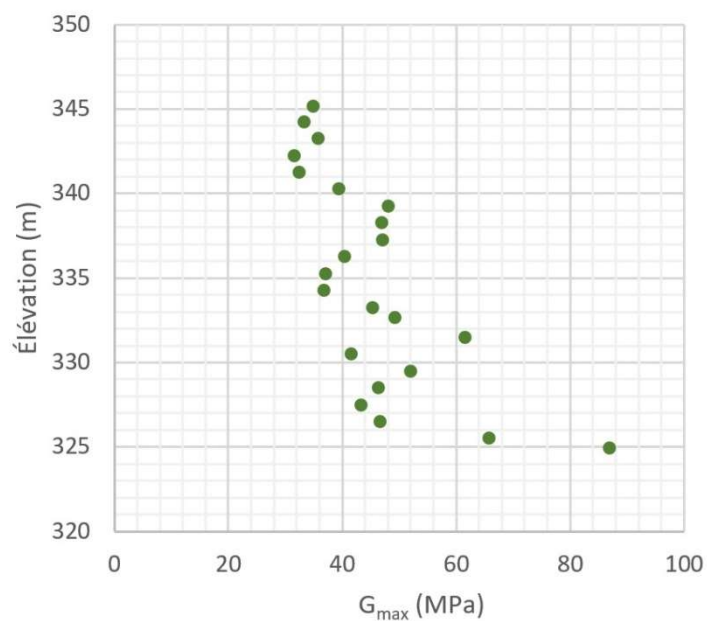
CPT16-72

Figure A9-23 : Module de cisaillement maximal obtenu avec la corrélation calibrée du CPT16-72

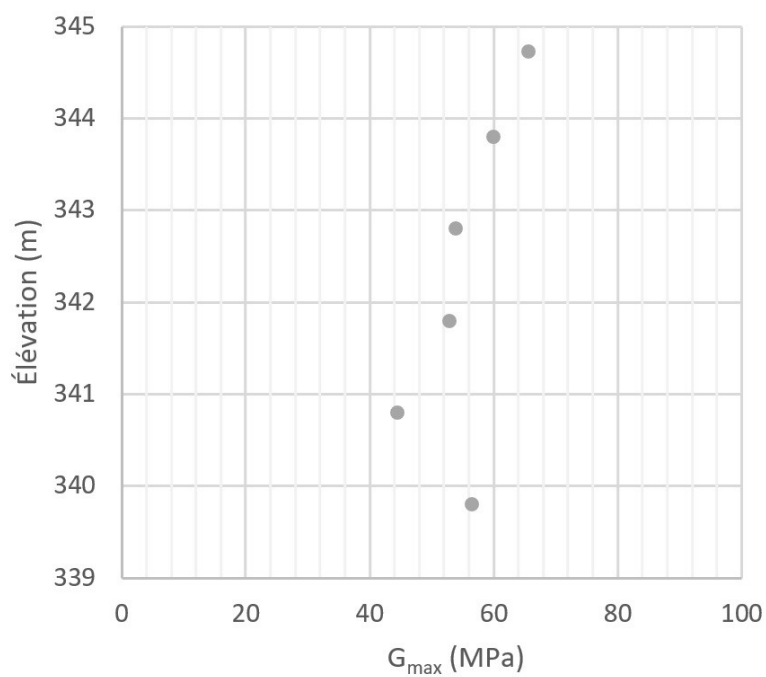
CPT16-73

Figure A9-24 : Module de cisaillement maximal obtenu avec la corrélation calibrée du CPT16-73

Vitesse des ondes de cisaillement

SCPT16-66

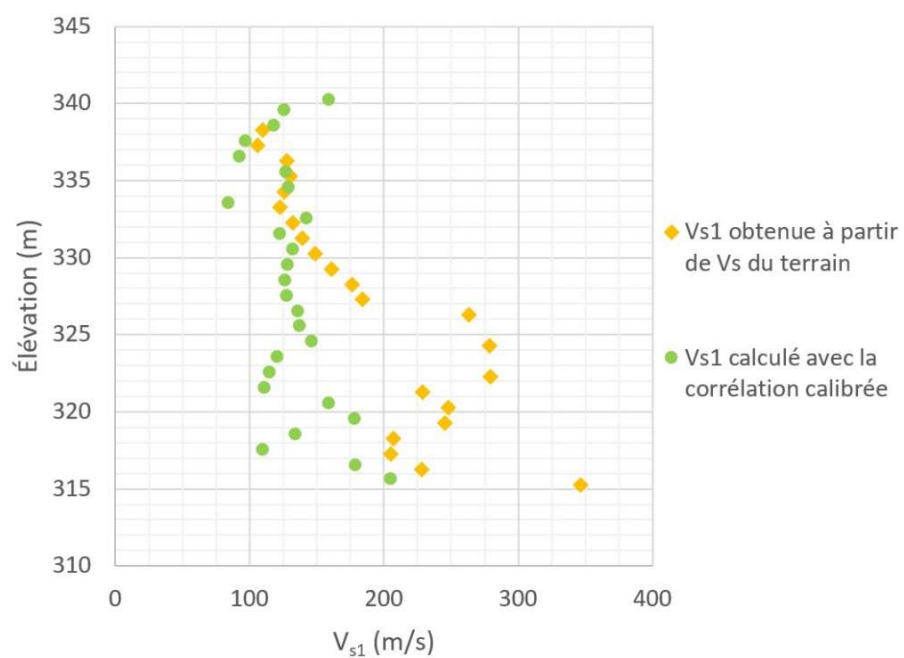


Figure A9-25 : V_{s1} obtenues avec la corrélation calibrée du SCPT16-66

SCPT16-67

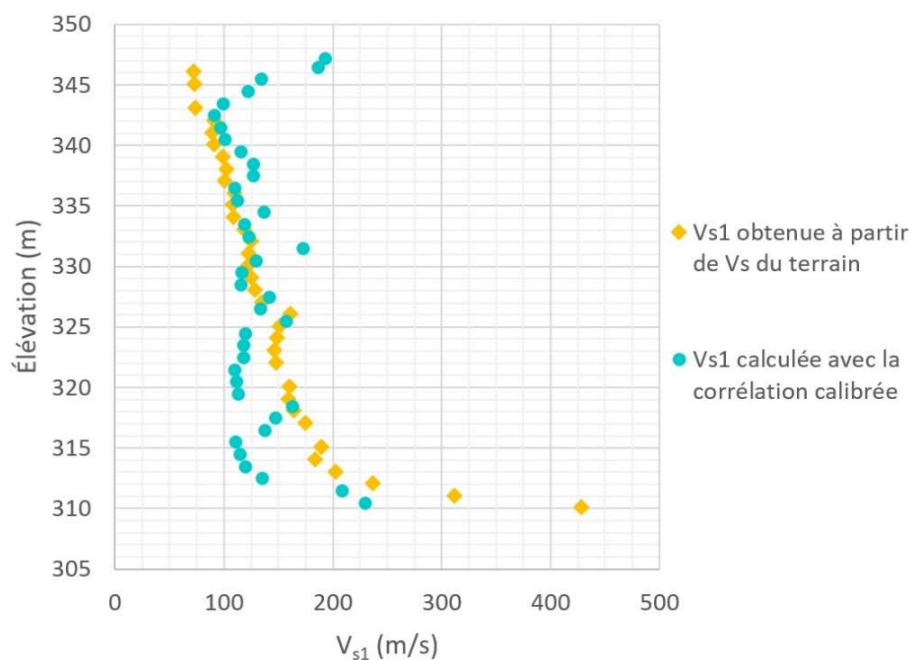
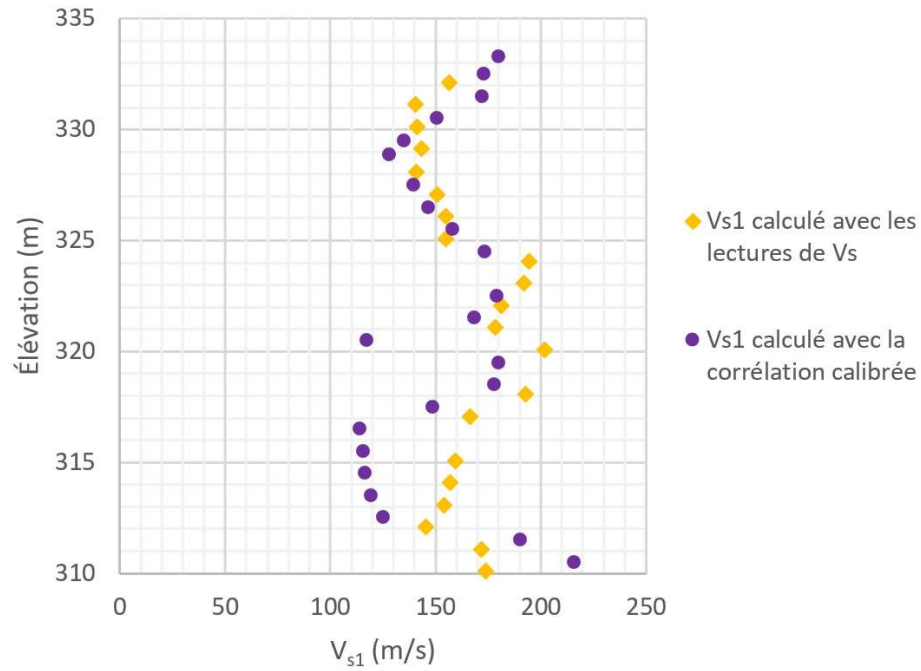
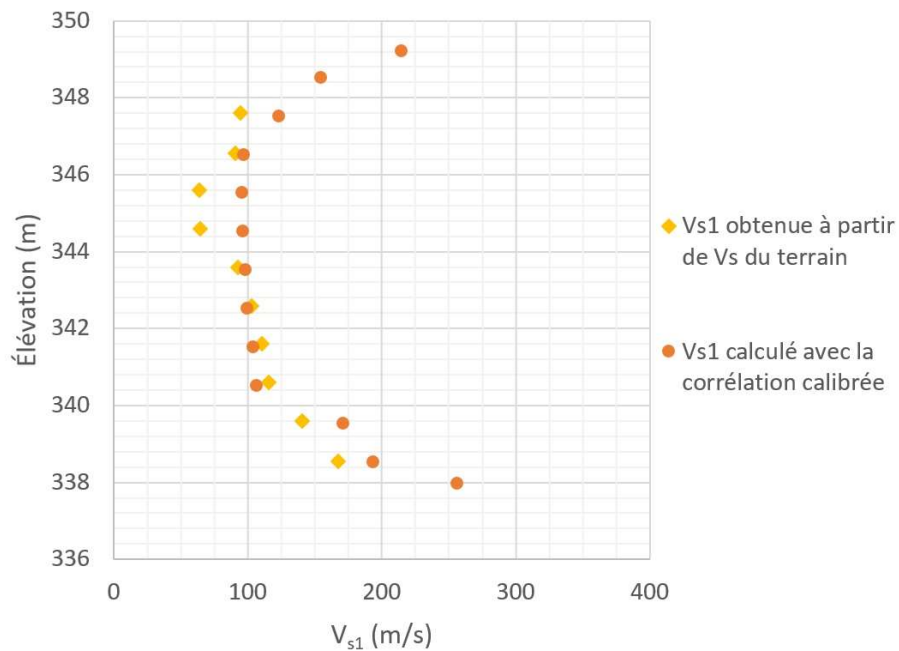
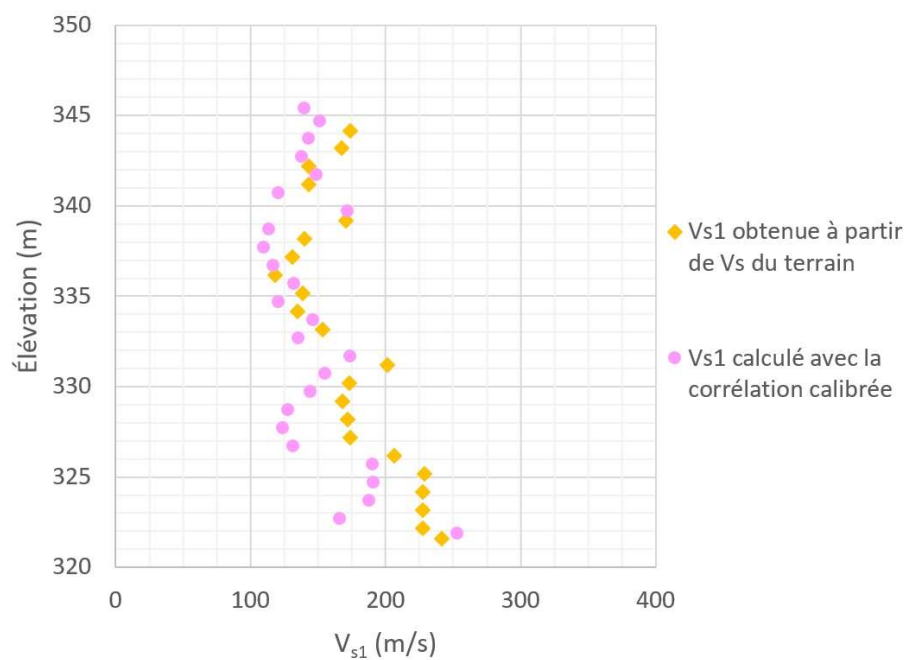
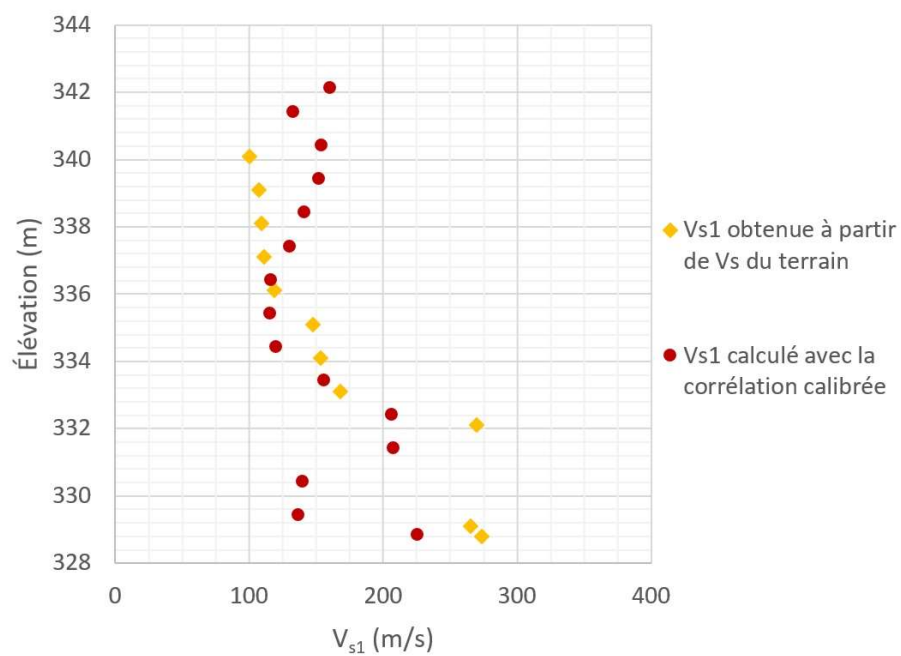
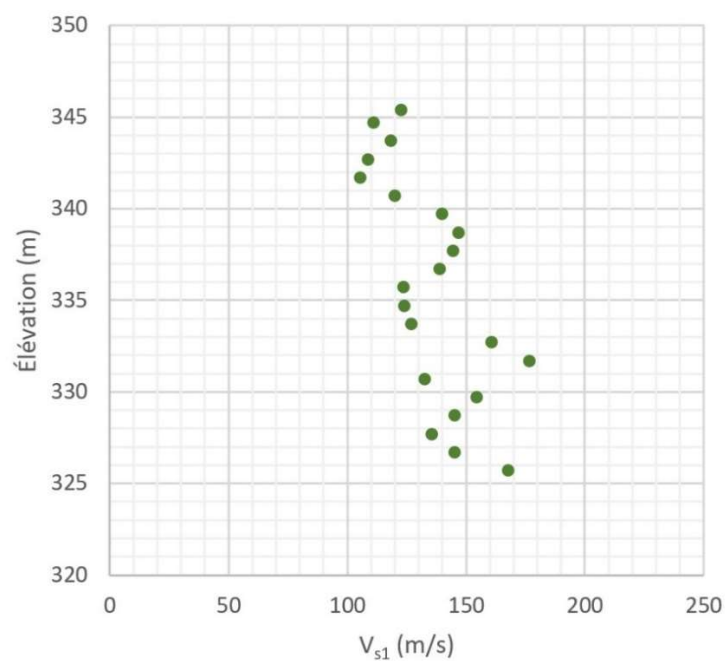
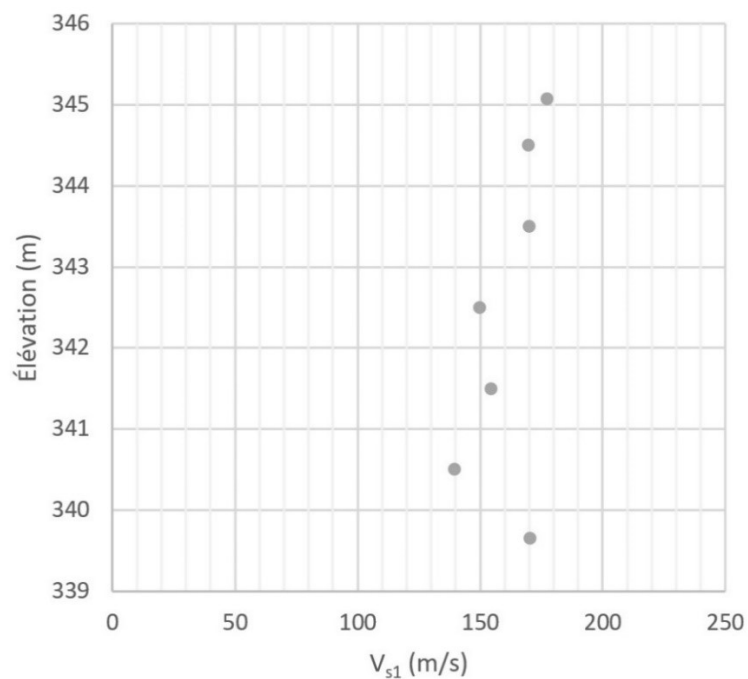


Figure A9-26 : V_{s1} obtenues avec la corrélation calibrée du SCPT16-67

SCPT16-68Figure A9-27 : V_{s1} obtenues avec la corrélation calibrée du SCPT16-68**SCPT16-69**Figure A9-28 : V_{s1} obtenues avec la corrélation calibrée du SCPT16-69

SCPT16-70Figure A9-29 : V_{s1} obtenues avec la corrélation calibrée du SCPT16-70**SCPT16-71**Figure A9-30 : V_{s1} obtenues avec la corrélation calibrée du SCPT16-71

CPT16-72Figure A9-31 : V_{s1} obtenues avec la corrélation calibrée du CPT16-72**CPT16-73**Figure A9-32 : V_{s1} obtenues avec la corrélation calibrée du CPT16-73

Indice de consolidation

SCPT16-66

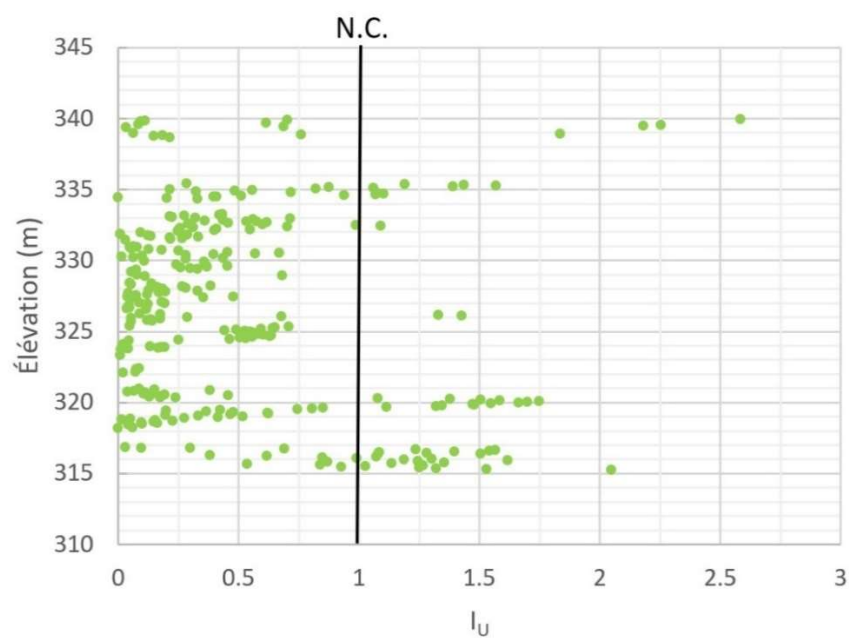


Figure A9-33 : Indice de consolidation en fonction de l'élévation du SCPT16-66

SCPT16-67

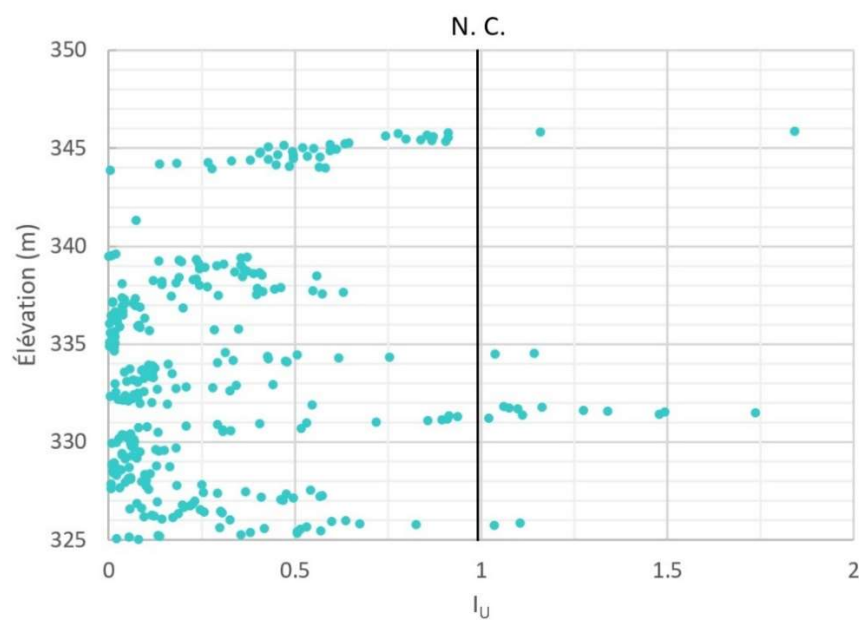


Figure A9-34 : Indice de consolidation en fonction de l'élévation du SCPT16-67

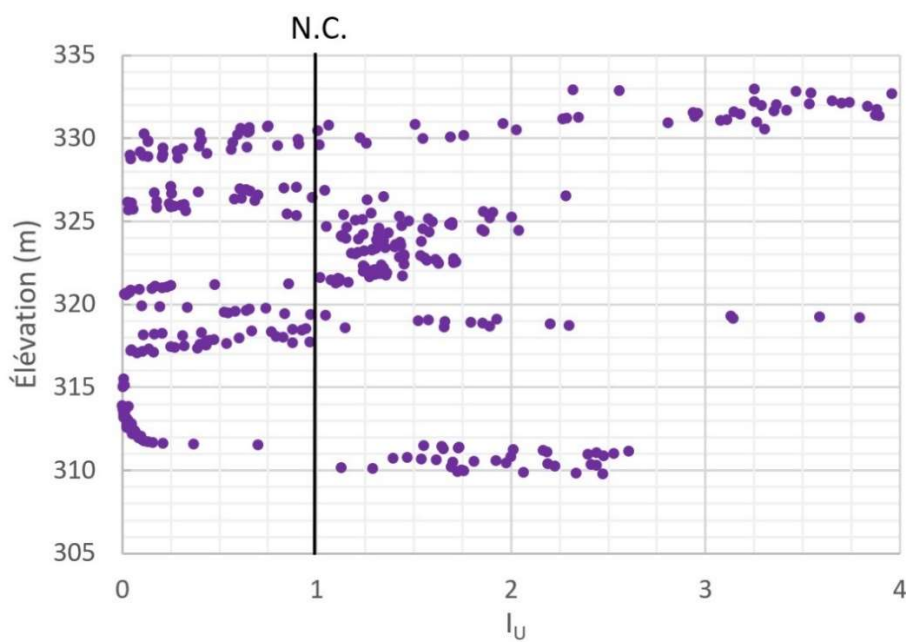
SCPT16-68

Figure A9-35 : Indice de consolidation en fonction de l'élévation du SCPT16-68

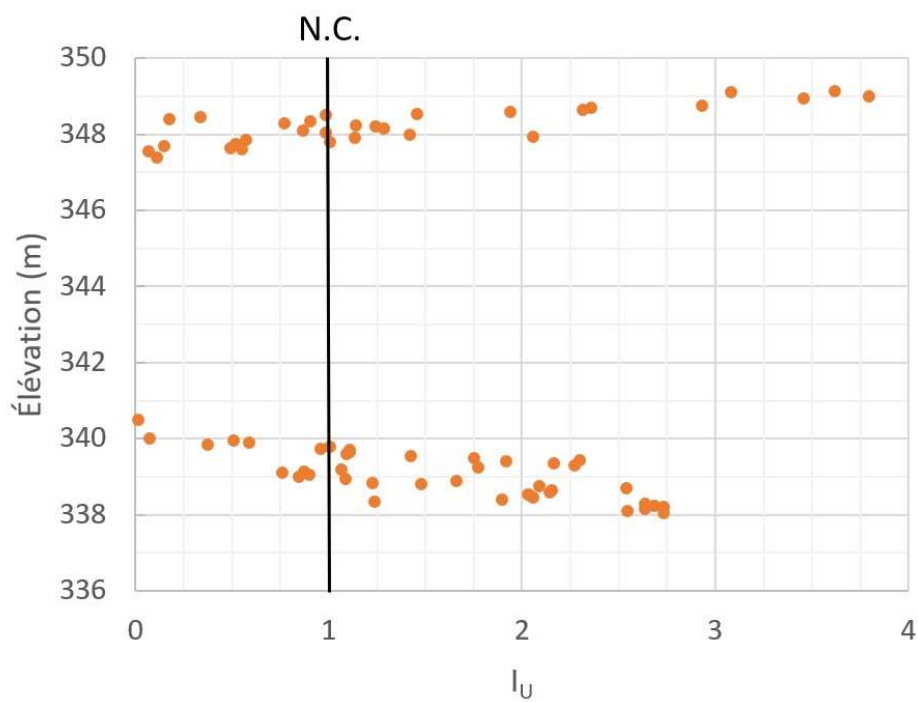
SCPT16-69

Figure A9-36 : Indice de consolidation en fonction de l'élévation du SCPT16-69

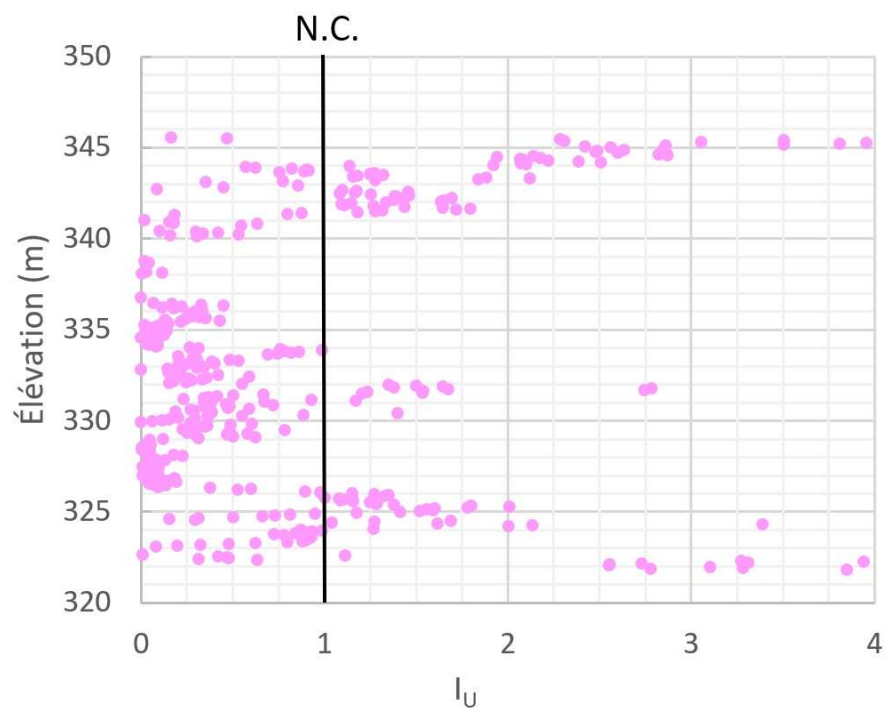
SCPT16-70

Figure A9-37 : Indice de consolidation en fonction de l'élévation du SCPT16-70

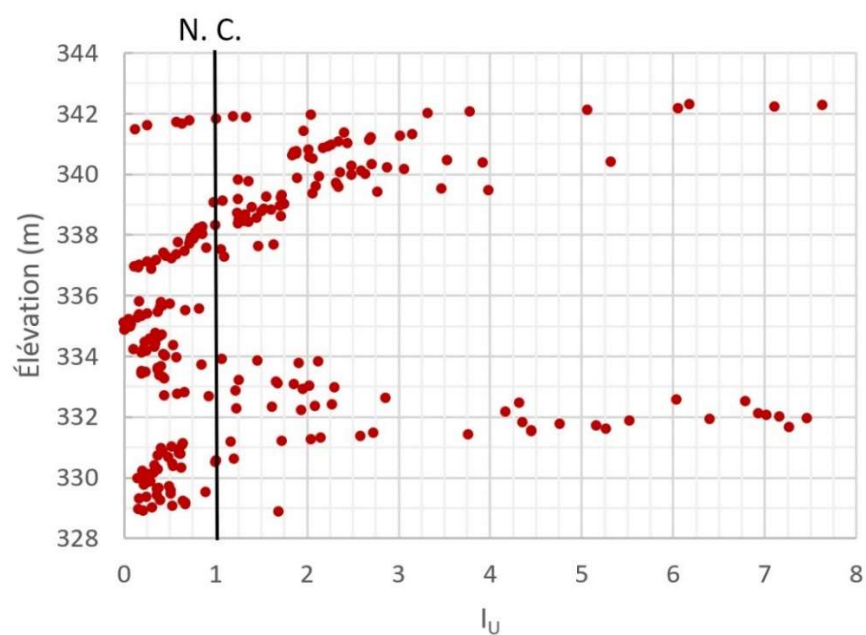
SCPT16-71

Figure A9-38 : Indice de consolidation en fonction de l'élévation du SCPT16-71

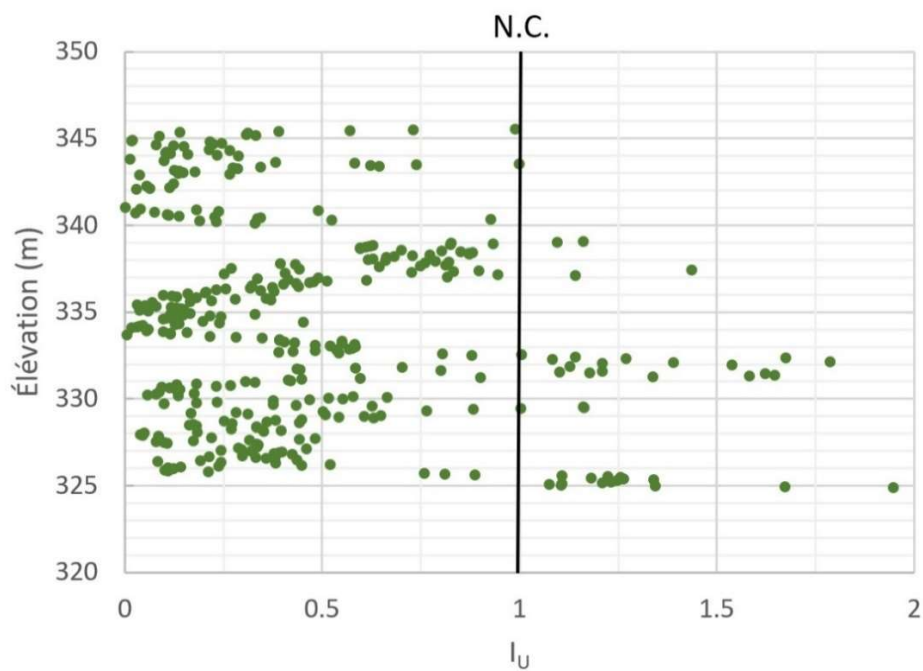
CPT16-72

Figure A9-39 : Indice de consolidation en fonction de l'élévation du CPT16-72

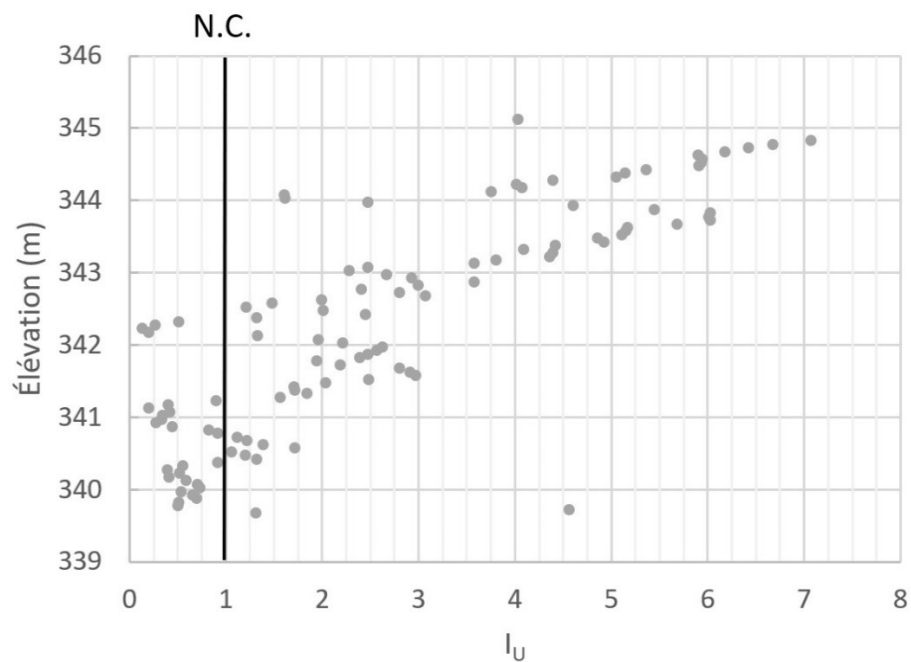
CPT16-73

Figure A9-40 : Indice de consolidation en fonction de l'élévation du CPT16-73

ANNEXE 10 – CONDITIONS *IN SITU* DES RÉSIDUS DES CPT_u DE 2013

CPT13-01

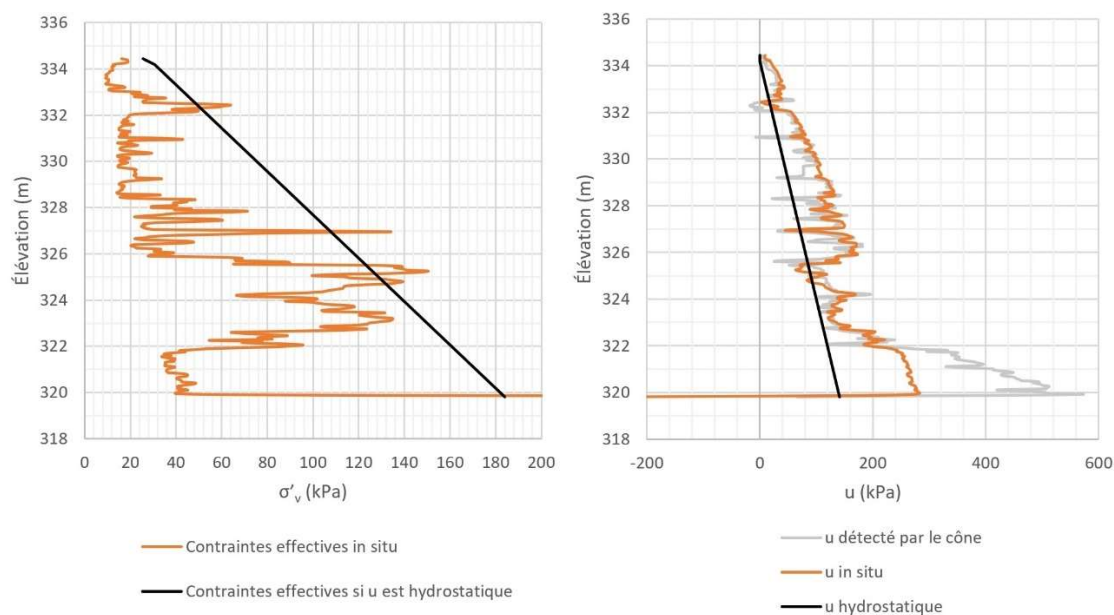


Figure A10-1 : Conditions *in situ* du CPT13-01

CPT13-02

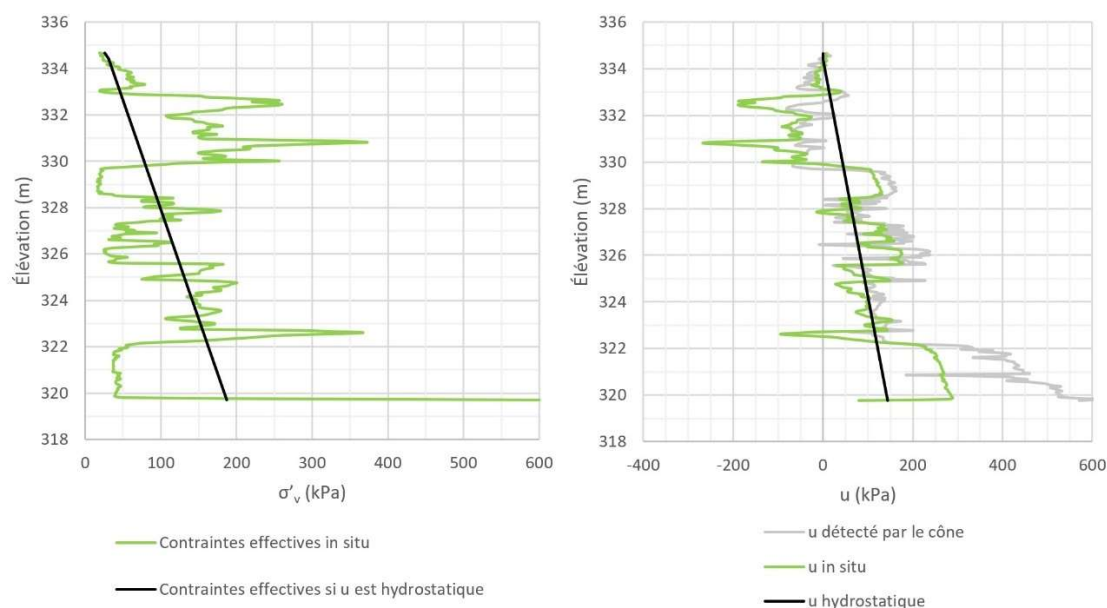
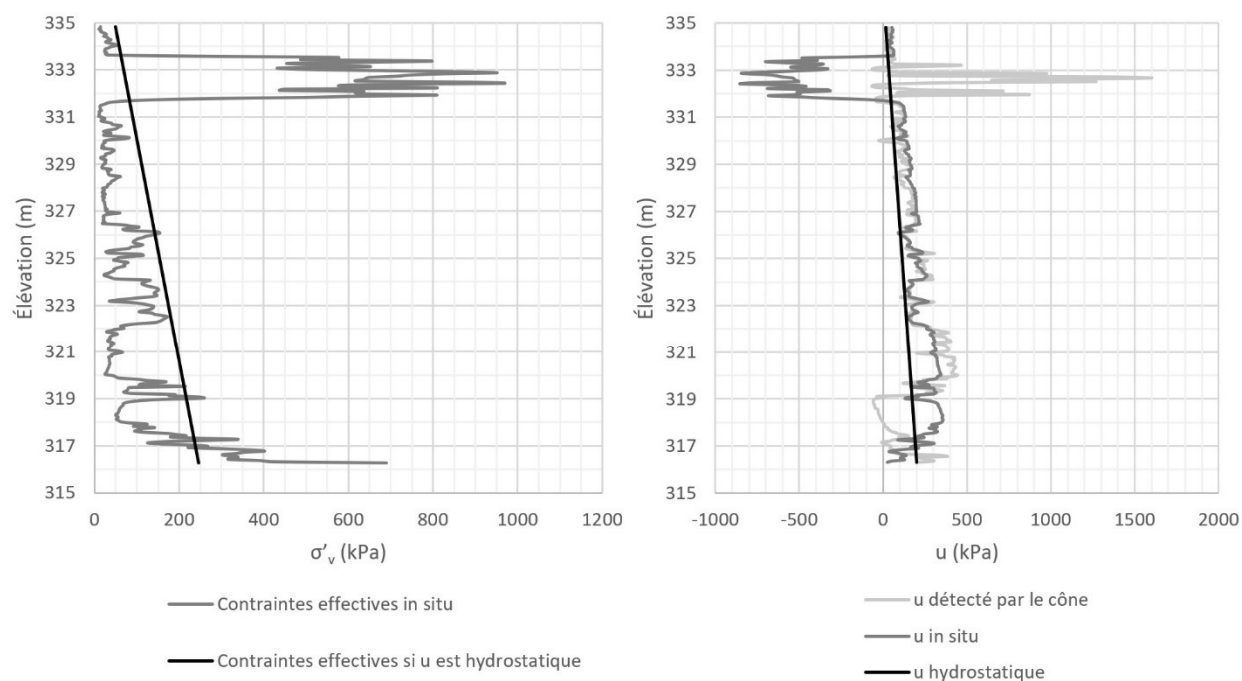
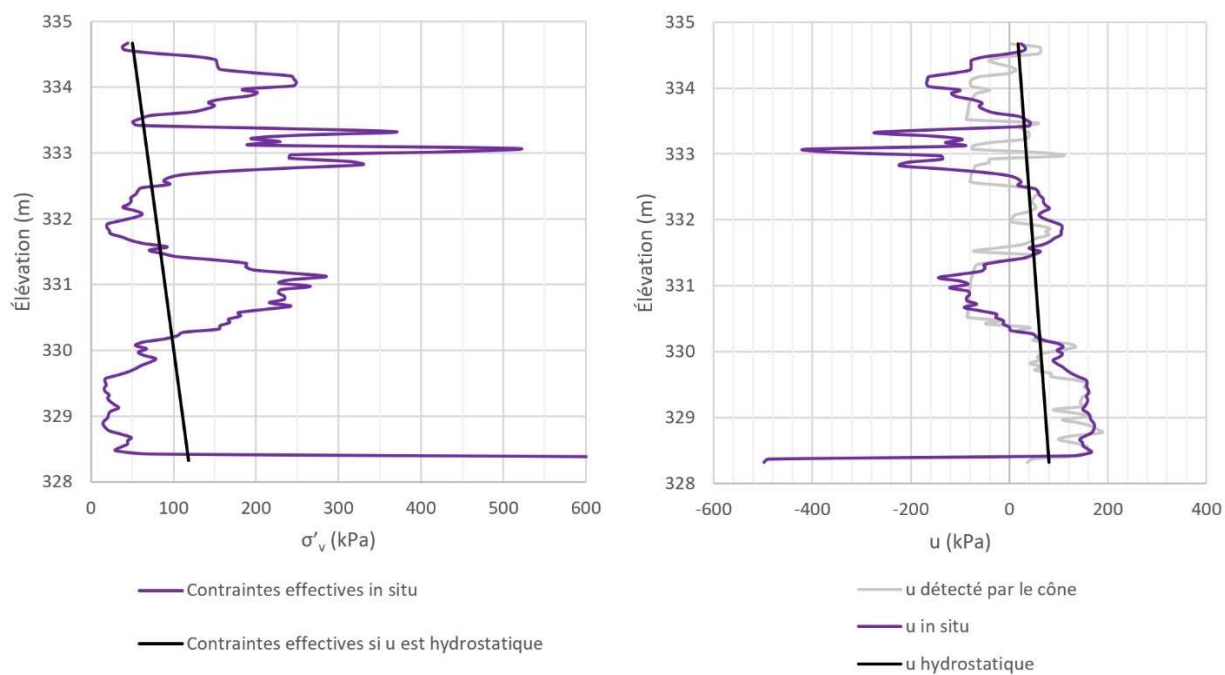
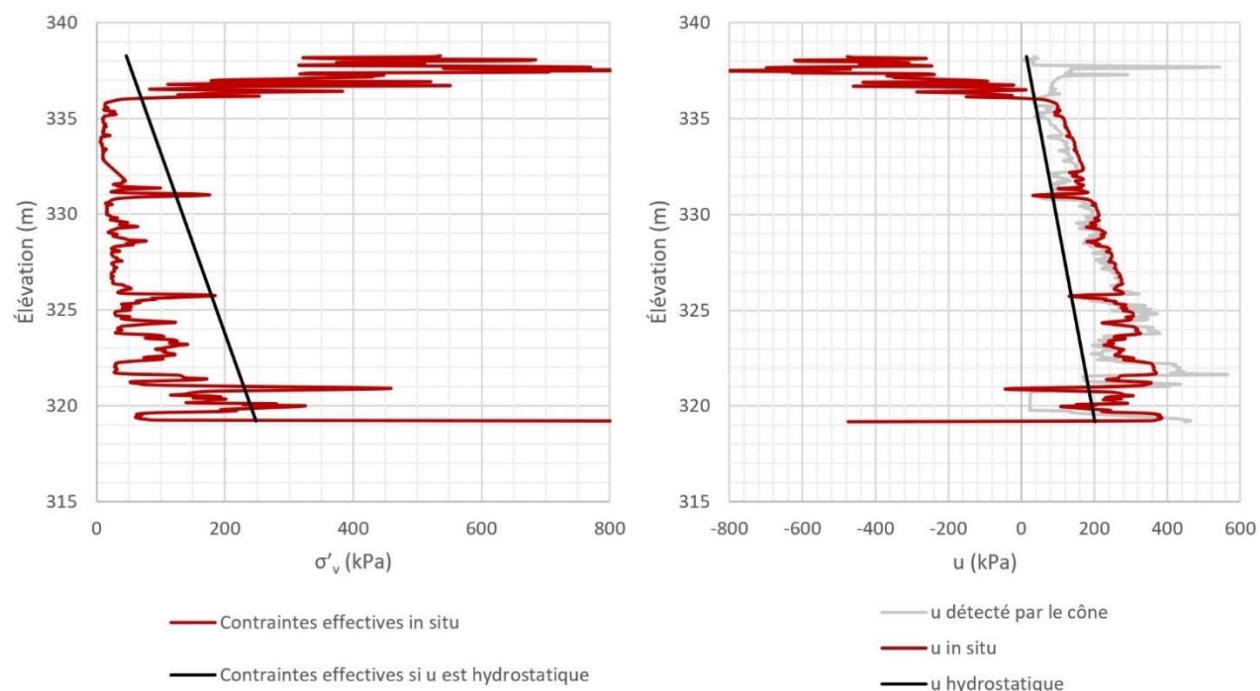
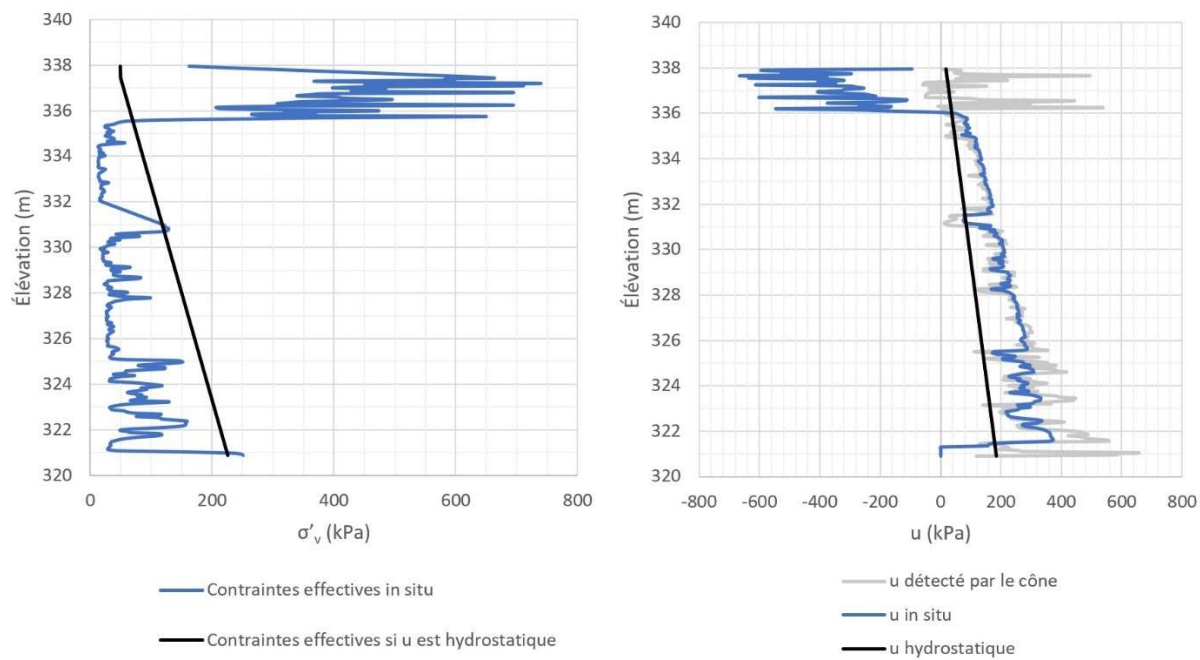


Figure A10-2 : Conditions *in situ* du CPT13-02

CPT13-03Figure A10-3 : Conditions *in situ* du CPT13-03**CPT13-04**Figure A10-4 : Conditions *in situ* du CPT13-04

CPT13-05Figure A10-5 : Conditions *in situ* du CPT13-05**CPT13-06**Figure A10-6 : Conditions *in situ* du CPT13-06

ANNEXE 11 – CONDITIONS *IN SITU* DES RÉSIDUS DES CPT_u ET SCPT_u DE 2016

SCPT16-66

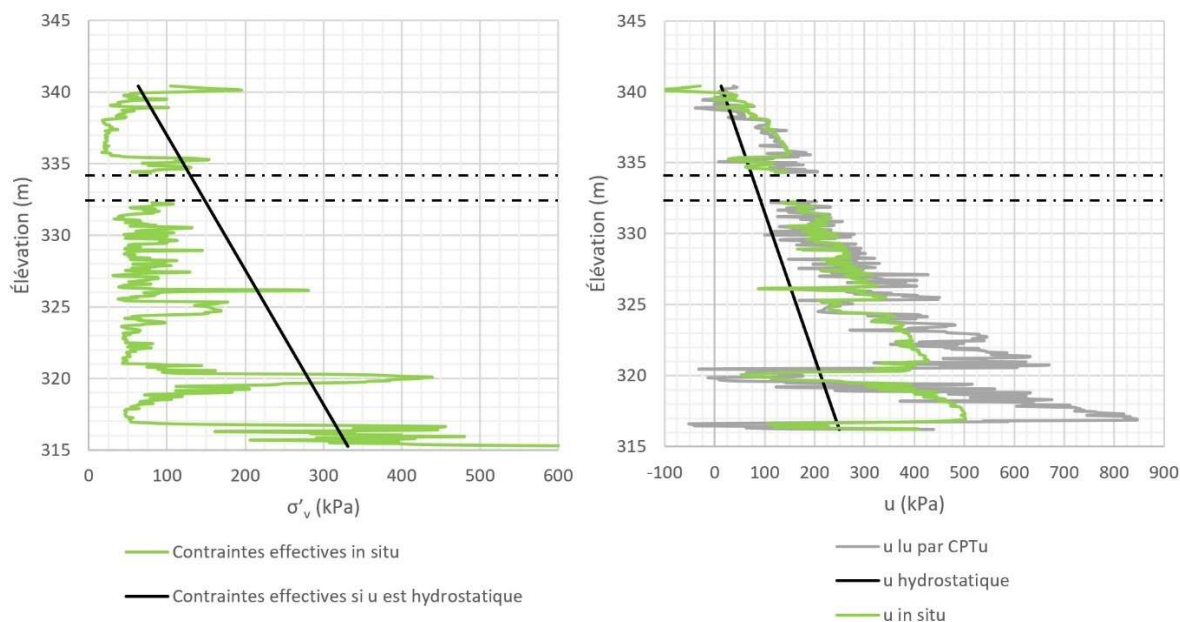


Figure A11-1 : Conditions *in situ* du SCPT16-66

SCPT16-67

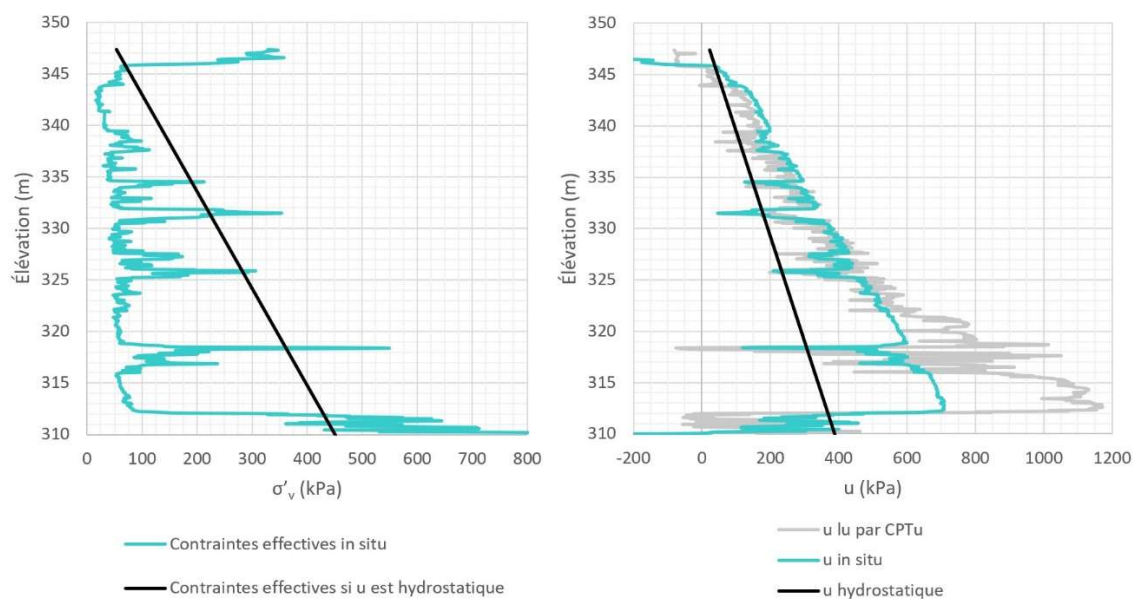
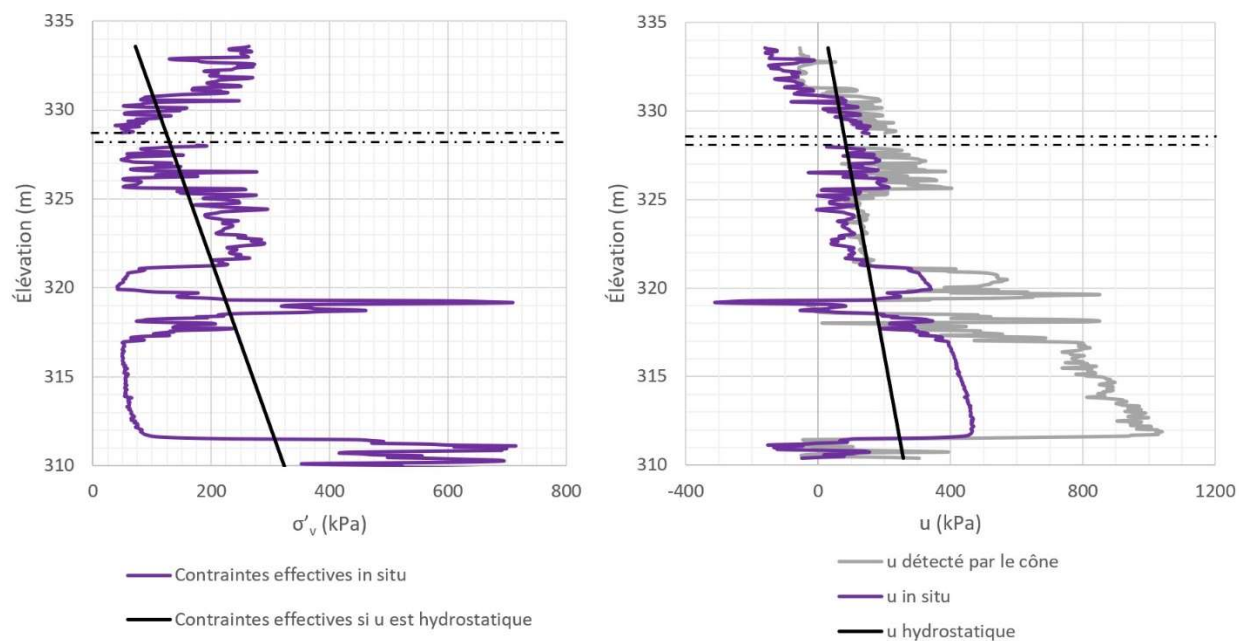
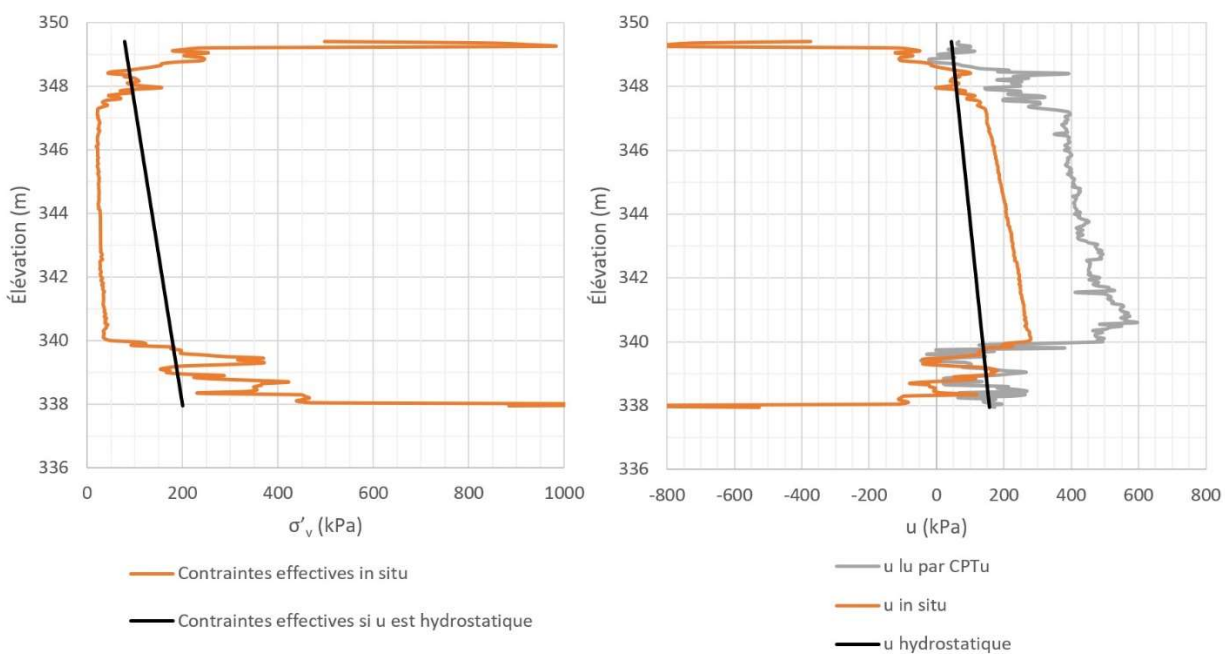
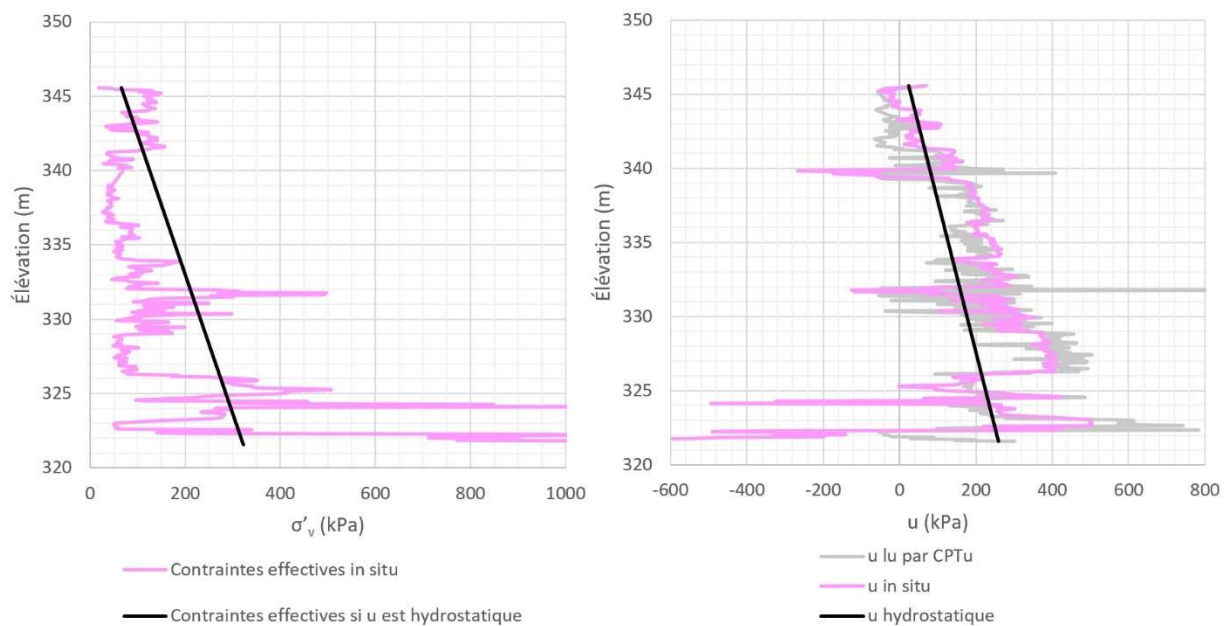
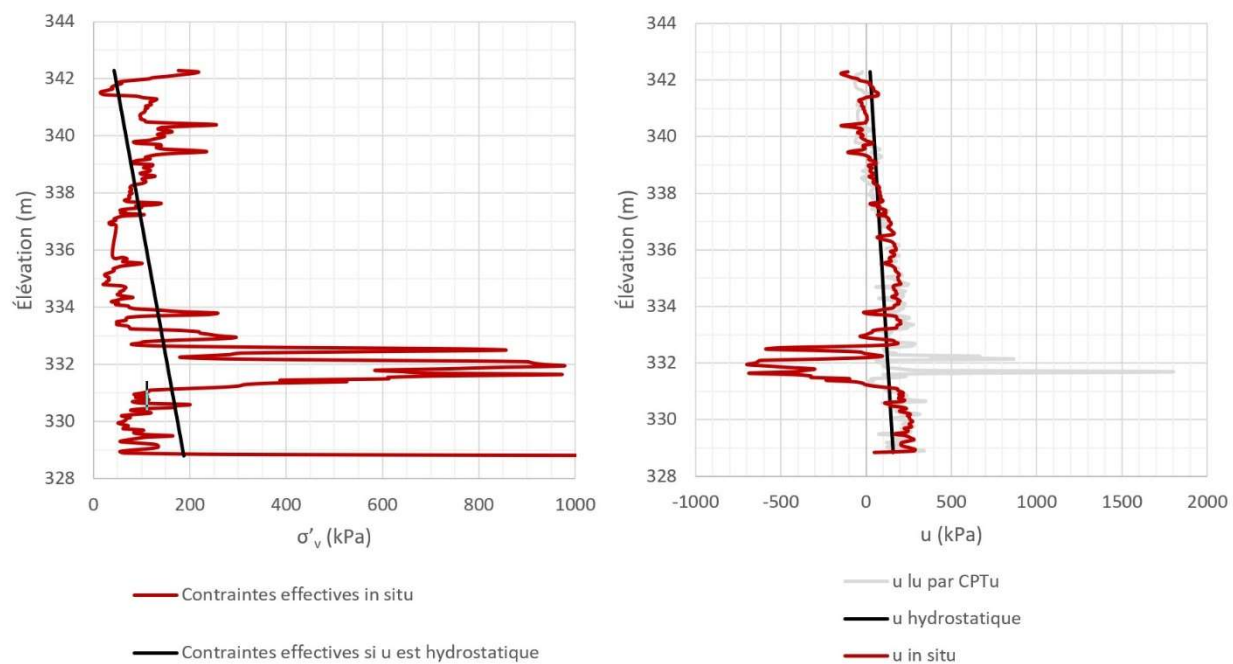
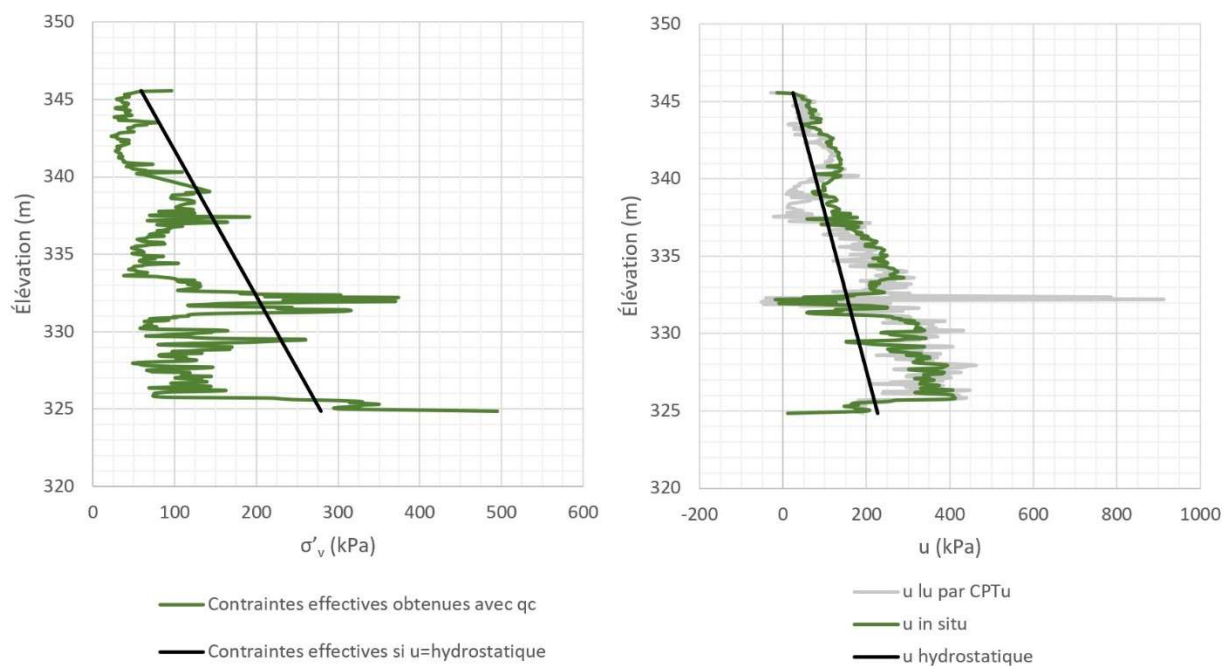
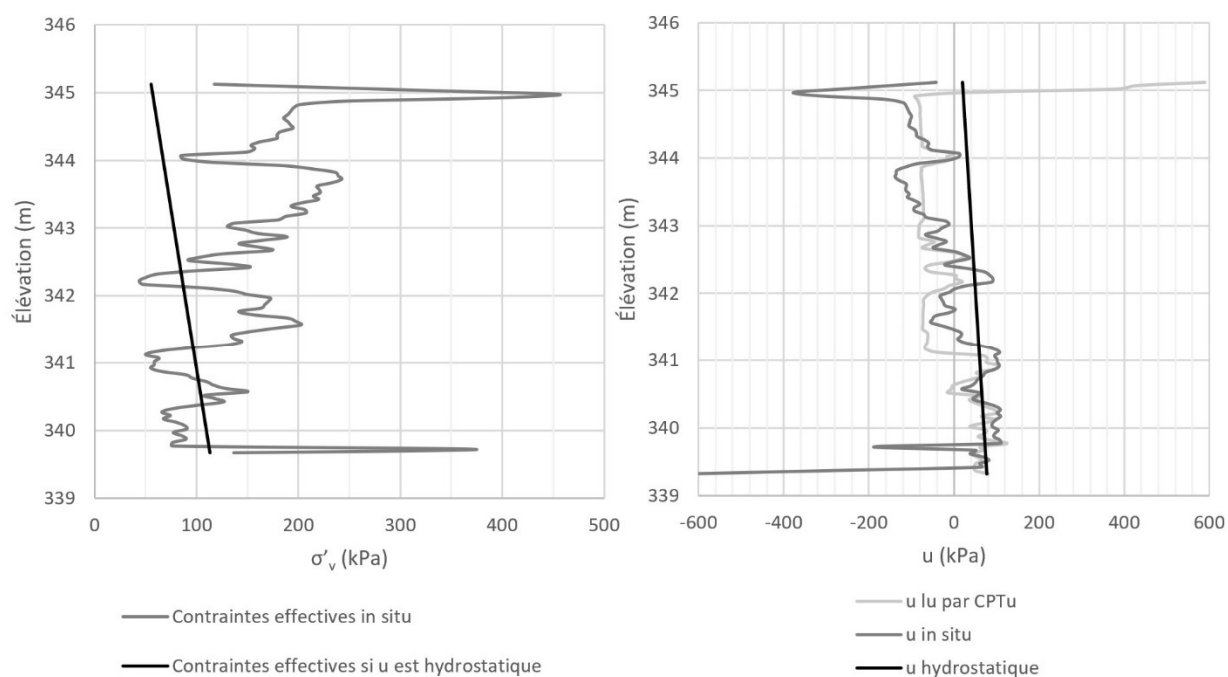


Figure A11-2 : Conditions *in situ* du SCPT16-67

SCPT16-68Figure A11-3 : Conditions *in situ* du SCPT16-68**SCPT16-69**Figure A11-4 : Conditions *in situ* du SCPT16-69

SCPT16-70Figure A11-5 : Conditions *in situ* du SCPT16-70**SCPT16-71**Figure A11-6 : Conditions *in situ* du SCPT16-71

CPT16-72Figure A11-7 : Conditions *in situ* du CPT16-72**CPT16-73**Figure A11-8 : Conditions *in situ* du CPT16-73